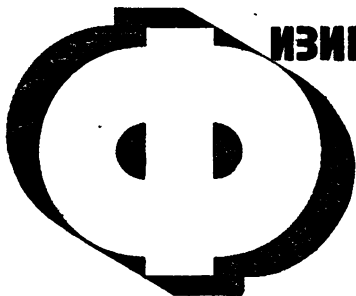


ИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ



А.И. Китайгородский

ЭЛЕКТРОНЫ



ЯЗЫКА ДЛЯ ВСЕХ

книга 3

А.И. Китайгородский

ЭЛЕКТРОНЫ



МОСКВА «НАУКА»

ГЛАВНАЯ РЕДАКЦИЯ

ФИЗИКО-МАТЕМАТИЧЕСКОЙ ЛИТЕРАТУРЫ

1979

АННОТАЦИЯ

«Физика для всех» Л. Д. Ландау и А. И. Китайгородского выпущена в 1978 г. четвертым изданием в виде двух отдельных книг: «Физические тела» (книга 1) и «Молекулы» (книга 2). Книга 3 «Электроны», написанная А. И. Китайгородским, выходит впервые и является продолжением «Физики для всех».

В этой книге пойдет речь о явлениях, где на первый план выходит следующий уровень строения вещества — электрическое строение атомов и молекул. В основе электротехники и радиотехники, без которых невозможно существование современной цивилизации, лежат законы движения и взаимодействия электрических частиц и в первую очередь электронов — квантов электричества.

Электрический ток, магнетизм и электромагнитное поле — вот главные темы этой книги.

ОГЛАВЛЕНИЕ

Предисловие	5
Глава 1. ЭЛЕКТРИЧЕСТВО	7
Электрический ток	7
Неподвижное электричество	13
Электрическое поле	15
Что взять за основу	21
Как развивалось учение об электричестве	25
Глава 2. ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА	27
Наименьшая порция электричества	27
Потоки ионов	28
Электронный луч	30
Опыт Милликена	33
Модель атома	37
Квантование энергии	39
Периодический закон Менделеева	41
Электрическое строение молекул	43
Диэлектрики	47
Проводимость газов	56
Самостоятельный разряд	60
Вещество в состоянии плазмы	64
Металлы	68
Выход электронов из металла	72
Термоэлектрические явления	74
Полупроводники	75
$p-n$ -переход	81
Глава 3. ЭЛЕКТРОМАГНЕТИЗМ	85
Мера магнитного поля	85
Действия однородного магнитного поля	91
Действия неоднородного магнитного поля	96
Амперовы токи	97
Электронное облако атома	101
Магнитные моменты частиц	103
Электромагнитная индукция	109

Направление индукционного тока	112
К истории открытия закона электромагнитной индукции	113
Вихревые индукционные токи	116
Индукционный толчок	118
Магнитная восприимчивость железа	119
Домены	123
Диамagneticные и парамагнитные тела	125
Магнитное поле Земли	127
Магнитные поля звезд	130
 Г л а в а 4. КОНСПЕКТ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ	 132
Синусоидальная ЭДС	132
Трансформаторы	139
Машины, которые создают электрический ток	141
Электродвигатели	146
 Г л а в а 5. ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ	 153
Законы Максвелла	153
Механические модели излучения	159
Два аспекта электромагнитного поля	164
Фотоэлектрический эффект	168
Опыты Герца	171
Классификация электромагнитного излучения	177
 Г л а в а 6. РАДИО	 181
Странички истории	181
Ламповый триод и транзистор	188
Радиопередача	191
Радиоприем	195
Распространение радиоволн	197
Радиолокация	199
Телевидение	202
Микроэлектронные схемы	206

ПРЕДИСЛОВИЕ

В первой книге серии «Физика для всех» читатель познакомился с закономерностями движения больших тел и силами тяготения. Вторая книга была посвящена молекулярному строению вещества и движению молекул.

В этой третьей книге мы рассмотрим электрическое строение вещества, электрические силы и электромагнитное поле.

В следующей, четвертой книге пойдет речь о фотонах, строении атомного ядра и ядерных силах.

Четыре книги будут содержать сведения о всех основных понятиях и законах физики. Конкретные факты, излагаемые в них, отобраны так, чтобы как можно более отчетливо проиллюстрировать содержание физических законов, продемонстрировать характерные для физики приемы рассмотрения явлений, дать представление о том, какими путями шло развитие физики, и, наконец, в самых общих чертах показать, что физика является фундаментом всего естествознания и техники.

На глазах одного поколения лицо физики изменилось. Многие ее главы разрослись в самостоятельные области, имеющие огромное прикладное значение. Думается, что сегодня нельзя считать себя образованным человеком, зная лишь основы физики. Физикой для всех должна стать серия книг, с помощью которых лица самых разных профессий смогут получить представление о принципах физики и узнать, какие новости произошли в физических науках за последние десятилетия.

Конечно, наибольший интерес эта серия представит все же для преподавателей и для школьников, желающих посвятить себя физике.

Я очередной раз напоминаю читателю, что он держит в руках не учебник, а научно-популярную книгу. В учебнике объем, отведенный тому или иному материалу, диктуется трудностью его понимания. Научно-популярная книга не следует этому правилу, и поэтому разные ее страницы читаются не одинаково легко. Другим существенным отличием является то, что в наших книгах мы можем разрешить себе схематичное изложение ряда традиционных глав, заставив старый материал потесниться и дать место новому.

Теперь о книге «Электронны». Необходимость напомнить определения простейших понятий, с помощью которых описываются электрические явления, я использовал в несколько своеобразной форме, а именно попытался дать представление о феноменологическом подходе к физике.

Две главы из шести посвящены прикладной физике. Электротехника дана в виде конспекта. Детальное описание этого предмета требует обращения к чертежам и схемам. Поэтому мы сочли возможным ограничиться изложением лишь основных принципов электротехники и важных фактов, которые должен знать каждый.

Так же обстоит дело и с главой, посвященной радио. Малый объем книги позволил коснуться лишь истории вопроса и беглого изложения основ радиотехники.

А. И. Китайгородский

ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

На примере учения об электричестве можно (и должно) знакомить читателя, проявляющего интерес к физике, с так называемым феноменологическим подходом к изучению природы. Слово «феномен» в переводе означает явление. Подход же, о котором идет речь, состоит в следующем. Исследователь не интересуется «природой вещей». Он пользуется словами лишь для того, чтобы рассказать о фактах. Его цель — не «объяснить», а лишь описать явление. Почти все термины, которые он вводит, имеют для него смысл лишь в том случае, если можно указать способ оценки числом тех или иных понятий.

Только для того, чтобы облегчить словесное изложение фактов, он прибегает к некоторым вспомогательным названиям. Но их роль совершенно второстепенная; вместо них можно было бы предложить другие имена или говорить «нечто» или «что-то».

Феноменологический метод играет в естествознании огромную роль. А электрические явления — на редкость подходящий пример для того, чтобы читатель понял его сущность.

В конце этой главы я вкратце расскажу, в какой последовательности развивались события, а сейчас изложу некую идеальную схему создания феноменологической теории электрических явлений.

Объединим в одном мифическом персонаже Шарля Огюстена Кулона (1736—1806), Алессандро Вольты (1745—1827), Георга Симона Ома (1789—1854), Андре Мари Ампера (1775—1836), Ганса Христиана Эрстеда

(1777—1851), Эмилия Христиановича Ленца (1804—1865) и еще нескольких замечательных ученых. Представим себе, что этот исследователь обладает современным научным мышлением, и вложим ему в уста современную терминологию. От имени этого исследователя мы и поведем изложение.

Он начинает свою работу построения феноменологической теории электричества с внимательного рассмотрения аккумулятора. Обращает прежде всего внимание, что у аккумулятора имеются два «полюса». Взявшись за них руками, он выяснит сразу, что лучше так не делать (удар довольно неприятен). Но после этого первого опыта ему приходит в голову такая мысль: видимо, через мое тело что-то пробежало; назовем это «что-то» электричеством.

Действуя со всей осторожностью, исследователь начинает соединять полюса различными проволочками, стерженьками и шнурами. Он убеждается в следующем факте: предметы, приведенные в соприкосновение с полюсами, иногда нагреваются сильно, иногда слабо; в некоторых случаях нагревания нет.

Подбирая подходящие слова для описания сделанного открытия, исследователь решает говорить о нем так. Когда я соединяю полюса проволокой, по ней течет электричество. Назову это явление электрическим током. Опыт показал, что разные предметы нагреваются по-разному. Те, которые нагреваются плохо, видимо плохо «проводят» электричество или создают большое сопротивление протекающему току. Их можно назвать изоляторами или диэлектриками.

Исследователь начинает работать с жидкостями. Выясняется, что и здесь разные вещества ведут себя по-разному. Наконец, делается интересное открытие: взяв в качестве жидкости раствор медного купороса и опустив в ванночку угольные электроды (такое название дается предметам, прикрепленным к полюсам), ученый обнаруживает на одном из углей красноватый осадок меди.

Теперь исследователь уже совершенно убежден, что явление, которое он изучает, связано с течением какого-то флюида. Ясно, что имеет смысл говорить о направлении тока. Скажем, условимся пометить знаком минус тот электрод, на котором осаждается медь, а дру-

гой считать положительным. Поскольку длинно говорить «отрицательный электрод» и «положительный электрод», для них предлагаются термины катод и анод. Ток течет от плюса к минусу, т. е. от анода к катоду.

Но ценность открытия на этом далеко не кончается. Устанавливается, что каждую секунду на катоде откладывается одинаковая масса меди. Видимо, атомы меди несут на себе электрический флюид. Поэтому исследователь вводит в обиход два новых термина. Во-первых, он полагает, что масса M меди пропорциональна количеству q прошедшего по цепи электричества, т. е. вводит определение

$$q = kM,$$

где k — коэффициент пропорциональности. И, во-вторых, он предлагает назвать силой тока количество электричества, протекающее по цепи в единицу времени:

$$I = q/\tau.$$

Исследователь существенно обогатился. Он может характеризовать ток двумя измеряемыми величинами: количеством тепла, которое выделяется на определенном участке цепи в единицу времени, и силой тока.

Теперь у него возникает новая возможность: сравнить токи, создаваемые разными источниками. Измеряется сила тока I , измеряется энергия Q , которая выделяется в форме тепла одним и тем же кусочком провода. Повторяя опыты с разными проводниками, исследователь выясняет, что отношение количества тепла к количеству электричества, протекающему через провод, различно для разных источников тока. Остается придумать подходящий термин для этого отношения. Было выбрано слово «напряжение». Чем выше напряжение, тем больше выделяется тепла.

Ну что же, это соображение можно считать обоснованием выбора слова. Чем больше напрягается человек, который тащит тележку с грузом, тем более жарко ему становится. Итак, обозначая напряжение, как это принято ныне, буквой U , получим:

$$U = Q/q, \text{ или } Q = UI\tau.$$

Итак, первые шаги сделаны. Обнаружены два явления. Ток выделяет вещество при прохождении через

некоторые жидкости, ток выделяет тепло. Мерять тепло мы умеем. Способ измерения количества электричества дан, т. е. дано *определение этого понятия*. Кроме того даны определения *производных* понятий — силы тока и напряжения.

Написан ряд простых формул. Но прошу обратить внимание: они не могут быть названы законами природы. В частности, исследователь *назвал* отношение Q/q напряжением, а *не нашел*, что Q/q равно напряжению.

А вот сейчас он приступает к поиску закона природы. Для одного и того же проводника можно независимо измерить две величины: силу тока и тепло, или силу тока и напряжение (что в принципе одно и то же).

Исследования зависимости силы тока от напряжения приводят к открытию важного закона. Подавляющее большинство проводников подчиняется закону:

$$U = IR.$$

Величине R можно дать название сопротивления, в полном соответствии с начальными качественными наблюдениями. Читателю знакома запись: это закон Ома. Подставляя значение силы тока из выражения закона Ома в предыдущую формулу, мы находим:

$$Q = \frac{U^2}{R} \tau.$$

Надеюсь, что вас не спутает возможность записать выражение энергии, выделяемой проводником в форме тепла, и иначе:

$$Q = I^2 R \tau.$$

Из первой формулы следует, что количество тепла обратно пропорционально сопротивлению. Говоря эту фразу, надо добавить: при неизменном напряжении. Именно этот случай мы и имели в виду, когда впервые воспользовались термином «сопротивление». А вот вторая формула, утверждающая, что тепло прямо пропорционально сопротивлению, требует, чтобы вы добавили: при постоянной силе тока.

В написанных выражениях читатель узнает закон, который носит имена Джоуля и Ленца.

Выяснив, что напряжение и сила тока пропорциональны, и получив, таким образом, возможность опре-

делять сопротивление проводника, исследователь естественно задается вопросом, как связана эта важная величина с формой и размером проводника и с веществом, из которого он сделан.

Опыты приводят к следующему открытию. Оказывается, что

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

где l — длина проводника, а S — его поперечное сечение. Это простейшее выражение справедливо тогда, когда мы имеем дело с линейным проводником неизменного сечения по всей своей длине. При желании, прибегнув к более сложным математическим операциям, можно записать формулу сопротивления для проводника любой формы. Ну, а что это за коэффициент ρ ? Он характеризует материал, из которого изготовлен проводник. Значение этой величины, которая получила название удельного сопротивления, колеблется в очень больших пределах. По величинам ρ вещества могут отличаться в миллиарды раз.

Прделаем еще несколько формальных преобразований, которые пригодятся в дальнейшем. Закон Ома можно записать в такой форме:

$$I = \frac{US}{\rho l}.$$

Приходится часто встречаться с отношением силы тока к площади сечения проводника. Его называют плотностью тока и обозначают обычно буквой j . Теперь тот же закон запишется так:

$$j = \frac{1}{\rho} \frac{U}{l}.$$

Исследователю кажется, что с законом Ома ему все ясно. Располагая неограниченным количеством проводников, сопротивление которых известно, можно отказаться от громоздких определений напряжения с помощью калориметра: напряжение ведь равно произведению силы тока на сопротивление.

Однако ученый быстро находит, что это утверждение нуждается в уточнении. Используя один и тот же источник тока, он замыкает его полюса различными

сопротивлениями. Сила тока, естественно, при каждом опыте будет разной. Но оказывается, что и произведение силы тока на сопротивление IR не остается одним и тем же. Занявшись изучением этого, пока что непонятного, явления, исследователь обнаруживает, что по мере увеличения сопротивления произведение IR стремится к некоторой постоянной величине.

Обозначив этот предел через $\mathcal{E}$, мы находим формулу, не совпадающую с той, которая была установлена прямыми измерениями силы тока и напряжения. Новая формула имеет вид:

$$\mathcal{E} = I(R + r).$$

Что за странное противоречие?

Приходится подумать. Ну, конечно, противоречие кажущееся. Ведь непосредственное измерение напряжения калориметрическим способом относилось только к проводу, замыкающему аккумулятор. А ведь ясно, что тепло выделяется и в самом аккумуляторе (для того, чтобы в этом убедиться, достаточно дотронуться до аккумулятора рукой). Аккумулятор обладает своим сопротивлением. Смысл величины r , стоящей в новой формуле, очевиден: это внутреннее сопротивление источника тока. Что же касается величины $\mathcal{E}$, то для нее нужно особое название. Нельзя сказать, что выбор был особенно удачным: величину $\mathcal{E}$ называют электродвижущей силой (ЭДС), хотя она не имеет ни смысла, ни размерности силы.

За обеими формулами сохранили (при этом надо сказать, что историческая справедливость была соблюдена) название законов Ома. Только первую формулу называют законом Ома для участка цепи, а вторую — законом Ома для полной цепи.

Ну, теперь уж, кажется, все ясно. Законы постоянного тока установлены.

Но исследователь все же не удовлетворен. И без непосредственного измерения напряжения калориметром исследование остается громоздким. Каждый раз взвешивать катод с осадком меди! Согласитесь, что это крайне неудобно.

В один воистину прекрасный день исследователь, совершенно случайно, поставил около проводника с током магнитную стрелку. И сделал великое открытие:

стрелка поворачивается, когда идет ток, и при этом в разные стороны в зависимости от направления тока.

Определять момент силы, действующий на магнитную стрелку, несложно. На основе открытого явления можно создать измерительный прибор. Надо только установить характер зависимости момента от силы тока. Исследователь решает эту задачу и конструирует превосходные стрелочные приборы, которые позволяют мерять силу тока и напряжение.

Однако наш рассказ о том, что сделал исследователь за первую половину девятнадцатого века, изучая законы постоянного тока, был бы неполным, если бы мы не сказали, что он обнаружил взаимодействие токов: токи, идущие в одну сторону, притягиваются, в разные — отталкиваются. Разумеется, и это явление можно использовать для того, чтобы измерять силу тока.

Конечно, я не ограничусь последними абзацами, говоря о законах электромагнетизма; ему посвящена отдельная глава. Но мне необходимо было напомнить эти важные факты для того, чтобы выполнить задачу данной главы, цель которой — рассказать, как вводятся основные количественные понятия и единицы измерения, характеризующие электрические явления: ток, заряд и поле.

НЕПОДВИЖНОЕ ЭЛЕКТРИЧЕСТВО

Будем считать, что нашему идеальному исследователю известны разнообразные явления, получившие названия электрических в давние времена. Особые свойства янтаря, стеклянной палочки, натертой мехом, создание искры, проскакивающей между двумя телами, приведенными в «электризованное» состояние, изучались (а лучше сказать — использовались для эффектных демонстраций) уже достаточно давно. Поэтому, естественно, у исследователя, который приступил к изучению электрического тока, возник вопрос: тот флюид, который течет по проводу, и тот, который может пребывать в неподвижном состоянии на каком-либо теле до тех пор, пока его не «разряжают», это одно и то же «не-что»?

А впрочем, даже отвлекаясь от сведений, которые были накоплены ранее, разве не нужно задать себе такой вопрос: если электричество — это «нечто», которое течет на манер жидкости, то нельзя ли его «налить в стакан»?

Если бы исследователь захотел получить на этот вопрос прямой ответ, то ему следовало бы поступить следующим образом. Берется источник тока достаточно высокого напряжения (пока мы не ведем разговора об единицах измерения, а посему читатель должен подождать с ответом на вопрос, что считать высоким напряжением, что — большой силой тока и пр.). Один из полюсов заземляется, а на второй кладется маленькая полая бусинка, сделанная из очень тонкой алюминиевой фольги. Шарик подвешивается на шелковой нити. То же самое делается еще с одним шариком.

Теперь поднесем эти два крошечных шарика близко друг к другу (скажем, на расстояние 2 мм между центрами). Исследователь с восторгом, изумлением (можете предложить любой другой эпитет) обнаруживает, что шарики отталкиваются. По углу, на который отклонились отвесы, и зная массу шариков, можно рассчитать силу, которая между ними действует.

Исследователь устанавливает: если шарики заряжены соприкосновением с одним и тем же полюсом аккумулятора, то они отталкиваются. Если один шарик получил электричество от одного полюса, а второй от другого, то они будут притягиваться.

Этот опыт подтверждает право говорить об электричестве как о жидкости и показывает, что можно иметь дело как с движущимся, так и с покоящимся электричеством.

Поскольку исследователь умеет определять количество электричества по массе меди, осаждающейся на катоде, то имеется возможность выяснить, «сколько жидкости налито в стакан», т. е. каково количество электричества, которое «забрано» на шарик с электрода аккумулятора.

Исследователь убеждается прежде всего в следующем. Если заряженный шарик «заземлить», т. е. соединить с Землей проводом, то шарик теряет заряд. Далее доказывается, что заряд «стекает» по проводу, т. е. что по проводу проходит ток. И, наконец, имеется возмож-

ность измерить то количество меди, которое выделится на катоде поставленного по дороге к Земле прибора с электролитом, т. е. можно измерить количество неподвижного электричества, которое было на шарике.

Это количество электричества исследователь называет зарядом шарика и приписывает ему знак — положительный или отрицательный, в зависимости от того, с какого электрода был подчерпнут электрический флюид.

Теперь можно приступить к следующей серии опытов. С разных аккумуляторов шариками разных размеров можно забирать различные количества электричества. Помещая шарики на разные расстояния друг от друга, можно измерить силу взаимодействия между ними. Исследователь находит следующий важный закон природы:

$$F = K \frac{q_1 q_2}{r^2},$$

сила взаимодействия прямо пропорциональна произведению зарядов шариков и обратно пропорциональна квадрату расстояния между ними. Читатель узнает в написанной формуле закон Кулона, который был установлен совсем не так, как мы рассказываем. Но наш исследователь — фигура внеисторическая.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ ПОЛЕ

Исследователь знаком с силами двух типов. Одни из них возникают при прямом контакте одного тела с другим. Так обстоит дело в случае тяги или толчка. Что касается сил, действующих на расстоянии, то до сих пор он знал только силу тяжести или шире — силу всемирного тяготения.

Теперь к этой знакомой присоединилась еще одна: сила кулоновского притяжения или отталкивания между двумя заряженными телами. Она очень похожа на силу тяготения. Даже и формулы напоминают друг друга.

Сила тяжести, действующая на тело со стороны Земли, не доставляла особых неудобств при расчетах. Что же касается кулоновских или, как их еще назы-

вают, электростатических сил, то здесь можно столкнуться с такими случаями, когда электрические заряды распределены в пространстве каким-то очень сложным, да еще вдобавок неизвестным способом.

Но ведь можно обойтись без знания распределения этих зарядов. Мы знаем, что эти заряды «чувствуют» друг друга на расстоянии. Почему бы не сказать так: заряды *создают электрическое поле*. Может показаться, что должна возникнуть трудность из-за того, что мы не видим электрического поля. Но я думаю, — говорит исследователь, — что электрическое поле не следует рассматривать как математическую фикцию, облегчающую расчет. Если на заряд, помещенный в какой-то точке, действует сила, то это означает, что эта точка (пространства) находится в особом состоянии. Электрическое поле является физической реальностью, т. е. существует само по себе, хотя мы и не можем его видеть. Конечно, доказать свою мысль исследователь, работающий в начале девятнадцатого века, не может. Но будущее покажет, что он был прав.

Закон Кулона устанавливает формулу, с помощью которой можно определить действие одного маленького шарика на другой. Можно один из шариков укрепить, а другой помещать в разные точки пространства. Во всех местах на подвижный (пробный) шарик будет действовать сила. Теперь тот же факт формулируется иначе: заряженный электричеством шарик создает вокруг себя поле электрических сил, или, короче, электрическое поле.

Источниками электрического поля могут служить заряженные тела любой формы. Закон Кулона в этом случае уже непригоден, но с помощью пробного шарика можно измерить электрическое поле, окружающее заряженное тело, и охарактеризовать его вполне исчерпывающим образом, указав величину и направление силы. Чтобы описание поля не зависело от выбора величины заряда пробного шарика, электрическое поле характеризуют его напряженностью:

$$E = F/q,$$

где q — электрический заряд пробного шарика.

Существует наглядный способ описания электрического поля с помощью силовых линий. В зависимости

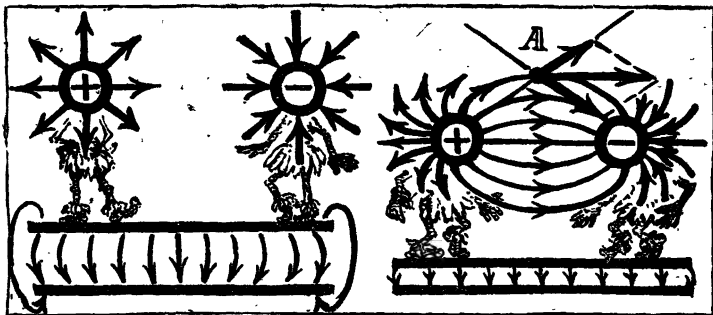


Рис. 1.1.

от формы заряженных тел и от их взаимного расположения эти графики могут иметь самый различный вид. На рис. 1.1 показаны простейшие картины полей. Смысл этих картинок следующий: касательная к силовой линии в какой-либо точке указывает направление электрической силы в этом месте. Число линий, приходящихся на единицу площади, перпендикулярной силовым линиям, совершенно условно, лишь бы оно было пропорционально значению E . Ну, а когда говорят о числе силовых линий и не пользуются картинками, то полагают это число просто равным величине E .

Если поместить свободный электрический заряд в электрическое поле, то он будет двигаться вдоль силовых линий, — если, конечно в дело не вмешиваются другие силы, например силы тяжести.

Самый простой вид имеют силовые поля тел, имеющих форму сферы. Если две сферы или два заряда, которые можно представить в виде точек, сближать друг с другом, то поля наложатся. Напряженности поля складываются по правилу параллелограмма. В любой точке A можно выяснить, как направлена силовая линия и чему равна напряженность поля, производя построение, показанное на рисунке.

Если заряженные тела имеют форму пластин, то поле будет выглядеть так, как показано на рисунке внизу. Сближая пластины и увеличивая площадь пластин, можно достигнуть почти идеальной однородности поля; краевой эффект будет незначительным. Про две близко расположенные пластинки можно сказать, что

они сгущают поле. Такое устройство называют конденсатором, что в переводе на русский язык и означает «сгуститель».

Как мы знаем, работа по перемещению тела под действием силы равна произведению силы на длину пути. Чтобы перенести заряд от одной пластины конденсатора к другой вдоль силовой линии, требуется работа, равная qEl . Работа, необходимая для переноса единицы количества электричества, равна El .

Давайте соединим две пластины конденсатора проводником. При перенесении по проводнику количества электричества q выделяется энергия qU . Поскольку мы догадываемся, что нет принципиального различия между движением заряженного шарика в электрическом поле и перемещением электрической «жидкости» вдоль металлического проводника, то мы приравниваем эти два выражения энергии, затраченной полем:

$$qEl = qU.$$

Справедливость написанного выражения можно легко проверить, раздвигая пластины конденсатора и измеряя силу, действующую на пробный заряд.

Это измерение можно провести очень изящным способом, вовсе не прибегая к подвешиванию заряженного шарика на шелковую нить.

Всем хорошо известно, что легкие тела падают вниз значительно медленнее, чем тяжелые. Напомним, что именно по этой причине до опытов Галилея мудрецы античности и средних веков полагали, что скорость движения тела (а не ускорение) пропорциональна силе. Ошибочность этой точки зрения была наглядно продемонстрирована лишь тогда, когда посмотрели, как падают кусочки бумажки и металлический шарик в вертикальной трубке, из которой откачан воздух. Оказалось, что все тела набирают скорость одинаково быстро, т. е. падают на Землю с одним и тем же ускорением. Но сейчас нам как раз имеет смысл «включить» влияние воздуха, сопротивление которого приведет к тому, что легкий пустотелый металлический шарик, с помощью которого мы демонстрировали закон Кулона, будет падать вниз очень медленно.

Если заставить его падать тогда, когда он находится между пластинами конденсатора, то, меняя напряжение

между пластинами, можно подобрать такое поле, которое остановит падение шарика. Равновесие осуществляется при условии, что сила тяжести равна силе поля, $mg = qE$. Из этого равенства можно найти значение напряженности поля и подтвердить правильность наших теоретических рассуждений.

Число силовых линий, проходящих через любую мысленную или реальную поверхность, находящуюся в электрическом поле, называется силовым потоком. Чему равен силовой поток, который проходит через замкнутую поверхность, охватывающую заряженные тела?

Сначала рассмотрим самый простой случай: поле создано одним маленьким шариком. Проведем сферу около шарика. Если радиус сферы R , то напряженность в любой точке поверхности сферы равна Kq/R^2 . Площадь сферы равна $4\pi R^2$. Значит силовой поток, проходящий через сферу, будет равен $4\pi Kq$. Но ясно, что поток останется тем же, если мы возьмем любую другую поверхность.

Теперь усложним картину и допустим, что поле создается большим числом заряженных тел любой формы. Но ведь их можно мысленно разбить на крошечные участки, каждый из которых эквивалентен точечному заряду. Обведем систему зарядов произвольной поверхностью. Поток от каждого заряда равен $4\pi Kq$. Совершенно естественным является предположение, что потоки будут арифметически складываться, а значит полный поток через любую замкнутую поверхность, охватывающую все заряды, пропорционален суммарному заряду тел, находящихся внутри этой поверхности.

Это утверждение является основным законом, командующим над электрическими полями (одним из четырех уравнений Максвелла, см. гл. 5).

Прошу заметить, что мы не вывели, не доказали эту формулу. Мы догадались, что дело должно обстоять так, а не иначе. Это и значит, что мы имеем дело с общим законом природы, справедливость которого устанавливается опытным подтверждением любых следствий, вытекающих из общего закона.

Очень важно знать общее правило, которое справедливо для любых систем. С помощью написанного закона ЭВМ вычислит за секунды электрическое поле,

создаваемое самой сложной системой заряженных тел. Мы же удовлетворимся скромной задачей и выведем (демонстрируя на этом элементарном случае приемы теоретической физики) практически важную формулу для емкости конденсатора.

Сначала определим это распространенное понятие. Емкостью конденсатора называется отношение заряда, который скапливается на его пластинах, к напряжению между обкладками, т. е.

$$C = q/U.$$

В случае конденсатора силовые линии не идут в стороны, они выходят из положительной пластины и входят в отрицательную. Если пренебречь искажением поля на краях конденсатора, то поток можно записать как произведение ES . Общий закон позволяет записать такое равенство:

$$ES = 4\pi Kq,$$

т. е. напряженность поля между обкладками

$$E = 4\pi K \frac{q}{S}.$$

С другой стороны, напряженность поля конденсатора может быть записана как

$$E = U/d.$$

Приравнивая эти два выражения, мы получаем формулу для емкости конденсатора:

$$C = \frac{S}{4\pi Kd}.$$

Технические конденсаторы представляют собой металлические полосы, которые прижаты к слюде или парафинированной бумаге. Эти вещества принадлежат к изоляторам. Какую же роль играет введение диэлектрика между обкладками конденсатора? Опыт показывает, что емкость конденсатора C связана с емкостью конденсатора без прокладки C_0 формулой $C = \epsilon C_0$.

Величина ϵ носит название диэлектрической проницаемости. Для воздуха, слюды, воды и сегнетовой соли значения ϵ равны соответственно 1, примерно 6, 81 и 9000.

ЧТО ВЗЯТЬ ЗА ОСНОВУ

Закон Ома и закон Джоуля — Ленца связывают между собой энергию, силу тока, напряжение и сопротивление. Можно сказать, что напряжение равно произведению силы тока на сопротивление. Можно сказать и так: силой тока называется напряжение, поделенное на сопротивление. Но оба эти определения, которые можно встретить в учебниках, страдают тем недостатком, что они удобны лишь в том случае, если справедлив закон Ома. А, как было сказано, этот закон верен не всегда. Поэтому лучше всего поступить так, как мы это сделали, а именно считать, что производной величиной является сопротивление проводника, которое определяется как отношение напряжения на концах проводника к силе тока, который через него идет.

Поскольку энергию электрического тока можно измерять, исходя из закона сохранения энергии — по тепловым и механическим действиям тока, то ясна целесообразность определения силы тока или напряжения как величины, производной от энергии. Наиболее естественно определить силу тока с помощью явления электролиза, а напряжение на концах участка цепи — как частное от деления выделенной энергии на количество электричества.

Однако читатель должен ясно представить себе, что эта система определений не является единственной. Вместо электролиза в основу определения силы тока может быть положено и любое другое его действие: скажем, действие тока на магнитную стрелку или на другой ток.

Нет в принципе ничего порочного и в таком пути: выбирается некоторый стандартный источник тока, а напряжение любого другого источника определяется числом эквивалентных стандартных элементов. Это не выдумка. Такое предложение было, а стандартный источник носит название элемента Вестона.

Еще один вариант: систему определений и единиц измерения можно строить, выбрав некоторое эталонное сопротивление, и опять-таки измерять все другие сопротивления, выяснив, сколько стандартных элементов подменяют данный проводник. В свое время в качестве

такой единицы сопротивления использовался столбик ртути заданных длины и сечения.

Полезно усвоить, что очередность введения физических понятий является делом произвола. Содержание законов природы, разумеется, от этого не изменяется.

До сих пор у нас шла речь о тех электрических явлениях, которые связаны с постоянным электрическим током. Даже оставаясь внутри этой группы явлений, имеется возможность построить различные системы определений понятий и соответственно различные системы единиц измерения. На самом деле наш выбор еще шире, ибо электрические явления вовсе не сводятся к постоянному электрическому току.

До сего времени во многих учебных книгах по физике понятие величины электрического заряда (или, что то же самое, количества электричества) определяют из закона Кулона, затем на сцену выходит напряжение и лишь потом, закончив изложение электростатики, автор вводит понятия силы тока и электрического сопротивления. Наш путь, как вы видели, был иным.

Еще больше произвола в выборе единиц измерения. Исследователь вправе поступать так, как ему удобно. Он лишь должен не забывать, что выбор единиц измерения скажется на коэффициентах пропорциональности, стоящих в разных формулах.

Нет ничего порочного, чтобы выбрать независимо единицы силы тока, напряжения и сопротивления. Но тогда в формуле закона Ома появится некоторый числовой коэффициент, обладающий размерностью. Вплоть до последнего времени, пока еще не были изгнаны из физики суровым приговором международной комиссии столь привычные калории, числовой коэффициент стоял в формуле закона Джоуля — Ленца. Это происходило по той причине, что единицы измерения силы тока и напряжения определялись совершенно независимо от выбора единицы энергии (тепла, работы).

В предыдущих параграфах я записал в виде пропорциональностей, а не равенств, лишь две формулы: ту, которая связывает массу вещества, осаждаемого на электроде, с количеством электричества, и закон Кулона. Сделал я это не случайно, а по той причине, что физики пока неохотно переходят к принятой, как закон, международной системе СИ и продолжают еще (правда, под

давлением редакторов книг и статей во все меньшей степени) пользоваться так называемой абсолютной системой единиц, в которой величина K в формуле Кулона для взаимодействия зарядов в вакууме кладется равной единице. Поступив так, мы предопределяем значение так называемой «абсолютной» единицы количества электричества (заряд равен единице, если два одинаковых заряда, расположенных на единичном расстоянии, взаимодействуют с единичной силой).

Если быть последовательным, то, меряя массу в граммах, вам пришлось бы вычислить значение коэффициента k в законе электролиза, указав, сколько вещества выделяется на электроде при прохождении одной абсолютной единицы заряда. Однако не листайте страницы учебников, вы не найдете такой величины для этого коэффициента. Зная категорическое нежелание техников отказаться от ампера и кулона, физики подставляли в формулу электролиза то число, которое определяло массу вещества, выделявшуюся при прохождении через жидкость одного кулона электричества. В книгах фигурировали две единицы для одной и той же величины. При этом ясно, что пользоваться той или другой из них было удобно в совсем разных случаях, ибо кулон равняется трем миллиардам абсолютных единиц.

Конечно, удобно положить K равным единице, но техники обращали внимание на то, что в уравнениях для силового потока, емкости конденсатора и в других формулах остается никому не нужный коэффициент 4π , и утверждали, что было бы полезным от него избавиться.

Как обычно бывает, победа осталась за лицами, более близкими к практике, чем к теории; принятая ныне система пошла по тому пути, которому техники следовали уже давно. Сторонники системы СИ настояли и на том, чтобы пользоваться одной единицей энергии во всех областях науки, а также потребовали, чтобы в качестве единственного электрического понятия, принятого за основное, фигурировала бы сила тока.

Таким образом, мы входим в учение об электричестве с единицей энергии джоуль. В качестве единицы количества электричества выбираем кулон, равный ампер-секунде. Предлагаем определять ампер по силе взаимодействия токов. Это определение (мы его приве-

дем на стр. 91 в главе, посвященной электромагнетизму) подобрано так, чтобы коэффициент k в формуле электролиза остался тем, к которому все давно уже привыкли. Но все же надо уяснить себе, что этот коэффициент в системе СИ *не определяет* величину кулона. Если точность измерения возрастет, то мы будем обязаны изменить эту величину так, чтобы сохранить определение ампера (правда, я не думаю, что это время наступит, ибо не представляю себе, чтобы точность измерения электродинамических сил превышала бы точность измерения массы).

Далее система СИ следует по тому пути, по которому я заставил шагать нашего исследователя. Появляется единица напряжения вольт, равная джоулю, деленному на кулон; единица сопротивления ом, равная вольту, деленному на ампер; единица удельного сопротивления — ом, умноженный на метр...

Но теперь мы добираемся до закона Кулона, и видим, что коэффициентом K мы уже не вправе распоряжаться. Сила измеряется в ньютонах, расстояние — в метрах, заряд — в кулонах. Коэффициент K становится размерным и имеет некую величину, которую надо определять опытным путем.

Закон Кулона редко бывает нужен, а выражение емкости конденсатора является рабочей формулой во многих технических расчетах. Чтобы избавиться от множителя 4π в формулах электрического потока, емкости конденсатора и многих других, техники уже давно заменили коэффициент K выражением $1/4\pi\epsilon_0$. По вполне понятным причинам ϵ_0 можно назвать диэлектрической проницаемостью вакуума. Она оказывается равной

$$\epsilon_0 = 8,85 \cdot 10^{-12} \text{ Кл}^2/(\text{Н} \cdot \text{м}^2).$$

Так что теперь поток силовых линий выражается формулой

$$\frac{1}{\epsilon_0} (q_1 + q_2 + \dots),$$

а емкость конденсатора записывается так:

$$C = \epsilon \epsilon_0 S/d.$$

Единица емкости одна фарада равняется кулону, деленному на вольт.

КАК РАЗВИВАЛОСЬ УЧЕНИЕ ОБ ЭЛЕКТРИЧЕСТВЕ

Учение об электричестве развивалось совсем не в той последовательности, в которой действовал наш «обобщенный» исследователь!

Электростатические явления были известны в далекой древности. Трудно сказать, было ли греческим ученым известно, какие тела, кроме янтаря (по-гречески «электрон» — наименование янтаря) приобретают, после того как их потереть, особые свойства и притягивают к себе соломинки. Лишь в семнадцатом веке Уильям Гильберт показывает, что этим странным свойством обладают алмаз, сургуч, сера, квасцы и многие другие тела. Этот замечательный ученый видимо первый создал приборы, с помощью которых можно было наблюдать взаимодействие наэлектризованных тел. В восемнадцатом веке уже известно, что некоторые тела способны удерживать заряды, а по другим телам заряды «стекают». Мало у кого есть сомнения, что электричество — это что-то вроде жидкости. Создаются первые электростатические машины, с помощью которых можно извлекать искры и приводить в «содрогание» цепочку людей, которые держат друг друга за руки, а один из них дотрагивается до проводника действующей электрической машины. Придворное общество многих стран посещает лаборатории ученых, как цирк. А ученые, в свою очередь, стараются всемерно театрализовать явления.

В восемнадцатом веке можно уже говорить об электростатике как о науке. Изготовлено большое число различных электроскопов, Кулон начинает проводить количественные измерения сил взаимодействия зарядов.

В 1773 г. Луиджи Гальвани (1737—1798) начал исследовать мышечные сокращения лягушки, происходящие под действием электрического напряжения.

Продолжая опыты Гальвани, в конце восемнадцатого века Вольта приходит к пониманию того, что по мышцам лягушки пробегает электрический флюид. Следующий замечательный шаг — это создание первого источника тока — гальванического элемента, а затем и вольтова столба.

В самом начале девятнадцатого века сведения об открытии Вольты уже известны всему ученому миру. Начинается исследование электрического тока. Одно открытие следует за другим.

Ряд исследователей изучает тепловое действие тока. Этим же занимался Эрстед, который действительно совершенно случайно обнаружил действие тока на магнитную стрелку.

Блестящие работы Ома и Ампера были проделаны примерно в одно и то же время — в двадцатых годах девятнадцатого века.

Работы Ампера быстро заслужили ему славу. А вот Ому не повезло. Статьи его, сочетавшие аккуратный эксперимент с точными расчетами, отличавшиеся строгостью и последовательным введением феноменологических понятий, оставлявшие совершенно без внимания «природу» вещей, были не замечены современниками, а если кто-либо писал о них, то только для того, чтобы высмеять «болезненную фантазию автора, стремящегося принизить достоинство природы». (Эти слова принадлежат, видимо, физику де ла Риву, не внесшему какого-либо вклада в науку.)

Крайне трудно читать оригинальные работы физиков, работавших в те времена. Экспериментальные находки излагаются чуждым нам языком. В ряде случаев невозможно даже понять, что подразумевал автор под тем или иным словом. Имена великих ученых живут в памяти потомков лишь благодаря заботам историков науки.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ ВЕЩЕСТВА

НАИМЕНЬШАЯ ПОРЦИЯ ЭЛЕКТРИЧЕСТВА

Долгое время все сведения, которыми обладали физики в отношении электрических явлений, сводились к уверенности в том, что электричество — это нечто вроде жидкости. Еще в конце девятнадцатого века был распространен такой анекдот. Экзаменатор, желая пошутить над неподготовленным студентом, говорит: «Ну, уж раз вы не могли ответить на все мои вопросы, разрешите задать вам самый простой: что такое электричество?» Студент отвечает: «Господин профессор, честное слово знал, но забыл». Экзаменатор восклицает: «Какая потеря для человечества, был один человек, который знал, что такое электричество, и тот забыл».

Первые подозрения о том, что электричество является не непрерывной жидкостью, а состоит из особых частиц, а также уверенность в том, что электрические частицы как-то связаны с атомами, были получены на основании изучения электролиза.

Проделявая опыты по разложению веществ, растворенных в воде, при прохождении тока через раствор, Майкл Фарадей (1791—1867) установил, что один и тот же электрический ток приводит к выделению различного количества вещества на электродах в зависимости от того, какое химическое соединение растворено в воде. Фарадей нашел, что при выделении одного грамм-атома одновалентного вещества через электролит проходит 96500 кулонов, а при выделении одного грамм-атома двухвалентного вещества это число удваивается.

Может быть вы думаете, что, придя к этому результату, Фарадей закричал «эврика» и объявил, что он

выяснил природу электричества? Нет, великий экспериментатор не разрешил себе такую фантазию. Фарадей — во всяком случае в том, что касалось электрического тока, — вел себя, как персонаж предыдущей главы. Он полагал необходимым пользоваться лишь теми понятиями, которые можно характеризовать числом.

Как же так, спросит читатель, ведь показано, что $6,02 \cdot 10^{23}$ (вы вспоминаете — это число Авогадро) атомов переносят 96500 кулонов электричества. Следовательно, поделив второе число на первое, я получу величину количества электричества, которое несет на себе любой одновалентный атом. Операция деления дает $1,6 \times 10^{-19}$ Кл. Вот она, наименьшая порция электричества, или «атом электричества», или «элементарный заряд»!

Но число Авогадро было определено лишь к 1870 году.

Только тогда (подумать — всего лишь сотню лет назад) физики, которые любят придумывать гипотезы (их темперамент и склад ума сильно отличают их от исследователя, который не хочет выходить за пределы феномена); решили, что весьма вероятным является следующее предположение. Наряду с электрически нейтральными атомами существуют частицы, несущие на себе один или несколько элементарных зарядов электричества (положительного или отрицательного). Атомы, несущие на себе положительный заряд (катионы), откладываются при электролизе на катоде; атомы, несущие на себе отрицательный заряд (анионы), откладываются на аноде.

Молекулы солей, растворимых в воде, распадаются на анионы и катионы, например молекула поваренной соли — хлористого натрия — распадается не на атомы хлора и атомы натрия, а на положительный ион натрия и отрицательный ион хлора.

ПОТОКИ ИОНОВ

Само собой разумеется, что явление электролиза лишь подсказывает исследователю идею о существовании электрических частиц.

В конце девятнадцатого и начале двадцатого веков

было предложено множество способов превращения молекул в заряженные осколки (это явление называется ионизацией), было показано, каким путем можно создать направленные потоки заряженных частиц, и, наконец, были разработаны методы измерения заряда и массы ионов. Первое знакомство с ионными потоками физики получили, включая в цепь постоянного тока стеклянную трубку с разреженным газом. При небольшом напряжении на электродах, впаянных в трубку, ток через нее не пойдет. Но, оказывается, совсем нетрудно превратить газ в проводник. К ионизации газа приводит действие рентгеновских лучей, ультрафиолетового света, радиоактивного излучения. Можно обойтись и без принятия специальных мер, но тогда надо подвести к трубке с газом более высокое напряжение.

Газ становится проводником тока! Можно предположить, что молекулы разламываются на анионы и катионы. Анионы движутся к положительному, а катионы к отрицательному электроду. Важный этап в исследовании этого явления состоял в создании потока частиц. Для этого в электроде надо сделать отверстие и прошедшие через него ионы одного знака ускорить электрическим полем. С помощью диафрагм можно создать узкий пучок анионов или катионов, движущихся со значительной скоростью. Если пучок падает на экран такого типа, который используется в телевизоре, то мы увидим светящуюся точку. Пропуская поток ионов через два взаимно перпендикулярных электрических поля и меняя напряжения на конденсаторах, создающих эти поля, можно заставить светящуюся точку бродить по экрану.

С помощью подобного устройства мы можем определить важнейший параметр частицы, а именно отношение ее заряда к массе.

В ускоряющем поле ионы набирают энергию, равную работе электрических сил, т. е.

$$\frac{1}{2}mv^2 = eU.$$

Напряжение нам известно, а скорость частиц определяется самыми различными способами. Можно, скажем, измерить отклонение светового пятнышка на экране. Ясно, что отклонение будет тем больше, чем больше путь, пройденный частицей, и чем меньше ее начальная

скорость. Задача решается вполне строго. Она похожа на расчет траектории горизонтально брошенного камня.

Есть также способы прямого измерения времени, затрачиваемого ионом на прохождение всего пути.

Итак, известны напряжение и скорость иона. Что же можно вычислить в результате такого опыта? Из уравнения следует: отношение заряда частицы к ее массе. И вот что обидно: как ни менять условия опыта, какими отклонениями и ускорениями частиц ни пользоваться, никак не удастся отделить величину заряда от массы. Лишь учитывая сведения, раздобытые химиками, и значение элементарного заряда, полученное из электролиза, удастся сделать уверенный вывод: заряды всех одновалентных ионов одинаковы, заряды всех двухвалентных ионов в два раза больше, трехвалентных ионов в три раза больше... Различия в отношениях заряда к массе, которые удастся мерить с исключительно большой точностью, можно поэтому рассматривать как метод измерения массы иона.

Вот поэтому прибор, играющий очень большую роль для химии и химической технологии, основанный на принципе описанного нами простенького опыта, носит название масс-спектрографа (книга четвертая), хотя по сути дела он измеряет отношение заряда к массе ионов.

ЭЛЕКТРОННЫЙ ЛУЧ

Не будем следовать зигзагообразному ходу исторических событий, который привел физиков к твердому убеждению, что не только существует наименьшая порция электричества, но что эта порция имеет материального носителя, названного электроном. Опишем эксперимент, который сейчас демонстрируется на школьных уроках.

Прибор, предназначенный для этой задачи, когда-то назывался катодной трубкой. Теперь его имя — электронно-лучевая трубка, или электронная пушка, или осциллограф. Если вы учились в школе давно и не видели этого прибора, не огорчайтесь. Вы хорошо знакомы с электронно-лучевой трубкой — это главная часть вашего телевизора, на экране которого электронный луч

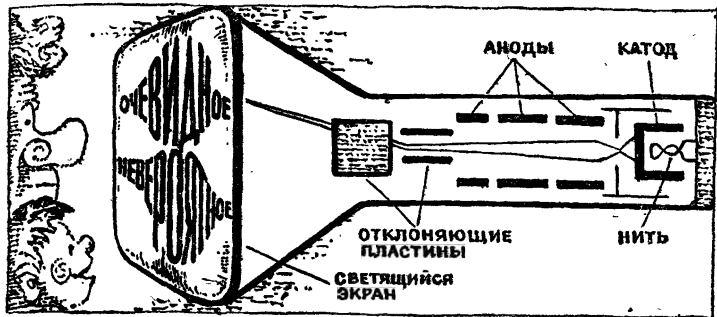


Рис. 2.1.

рисует картины, наблюдение которых иногда доставляет удовольствие и всегда позволяет убить свободное время.

Но вернемся к школьному опыту. Схема трубки показана на рис. 2.1. Трубка идеально откачана; молекул, которые могли бы разрушаться, в ней нет. Однако, накалив ток (его называют катодным) металлическую нить, а затем подсоединив катод и анод к соответствующим полюсам источника напряжения, вы обнаружите на экране трубки светящуюся точку, а при помощи измерительного прибора установите, что от анода к катоду пошел электрический ток. Естественно назвать его анодным.

Раз ток идет через пустоту, то придется сделать вывод, что раскаленная нить испускает отрицательно заряженные частицы. Явление носит название термоэлектронной эмиссии. Любое раскаленное тело обладает этой способностью.

Частицы — не станем скрывать от читателя, что это и есть электроны, — направляются к анодам, имеющим форму стаканов с круглым отверстием в дне. Электроны выходят в виде узкого пучка, который можно исследовать теми же способами, которые мы только что описали для пучка ионов.

Убедившись при помощи светящегося экрана в том, что раскаленная нить испускает электроны, мы приступаем с помощью отклоняющих пластин к определению отношения заряда к массе. Результат оказывается следующим. Отношение для электрона в 1840 раз больше,

чем это же отношение для самого легкого иона, а именно иона водорода. Мы делаем отсюда заключение, что электрон в 1840 раз легче иона водорода. Это значит, что масса электрона равна $9 \cdot 10^{-28}$ г.

Однако читатель вправе заметить, что мы слишком торопимся. Ведь нельзя же из измерения отношения заряда к массе электрона делать заключение, что его масса меньше массы иона. А может быть заряды положительного иона и электрона совсем разные?

Первое определение отношения заряда к массе электрона было проведено еще в конце прошлого века замечательным физиком Джозефом Джоном Томсоном (1856—1940). (Друзья называли его Джиджи. Вероятно, это сокращение, которое часто встречаешь в мемуарной литературе, вызвано не столько любовью англичан ко всякого рода аббревиатурам, как тем, что в девятнадцатом веке жил и работал другой замечательный физик, носивший ту же фамилию. Это Вильям Томсон, который за свои научные заслуги был возведен в дворянское достоинство, после чего стал именоваться лордом Кельвином.) Конечно, катодная трубка, которой он пользовался, была гораздо менее совершенной, чем современный осциллограф. Томсон превосходно понимал, что его измерение лишь делает вероятным дискретность электрического заряда и существование наименьшей порции электричества.

Как это ни кажется странным, несмотря на то, что многие физики наблюдали поведение катодных и анодных лучей, было еще много сторонников гипотезы, что эти лучи имеют волновую природу. Эти исследователи не видели необходимости признать, что токи, текущие по металлическому проводу, по жидкости и проходящие через газы и вакуум, являются ближайшими родственниками. Они настаивали на более прямых доказательствах. И, конечно, мы можем это понять: для превращения гипотезы в факт косвенные аргументы недостаточны.

Итак, прежде всего было необходимо подкрепить эту уверенность прямыми измерениями величины заряда частицы. Эти попытки — отнюдь не безуспешные — начали предприниматься самим Томсоном и его учениками в первых годах XX века. Наиболее точные измерения были проведены в 1909 г. Робертом Милликеном.

Мысль о дискретности электричества представляется очень смелой, а вычисление элементарного заряда способом, с рассказа о котором мы начали главу, можно трактовать и иначе. Почему, например, не сказать, что анионы существуют в действительности, а отрицательное электричество является жидкостью, которая увлекается положительным ионом. Один ион захватывает одно количество этой жидкости, другой ион — другое количество, а опыт дает некую среднюю величину. Вполне здравое объяснение.

Как было только что сказано, опыты Томсона были сильным, но не решающим доводом в пользу существования электрона. Поэтому не приходится доказывать, сколь важен был для физики эксперимент, в котором наличие элементарного заряда электричества было доказано с такой степенью наглядности, что все сомнения были тут же отброшены в сторону. Такой опыт был поставлен в 1909 г. американским физиком Робертом Милликеном. Я не стану говорить о других работах этого ученого. Но одного этого исследования было достаточно для того, чтобы его имя вошло во все учебники по физике.

Идея этого замечательного опыта основывается на простом факте. Так же, как стеклянная палочка, потертая мехом, приобретает электрические свойства, так ведут себя и другие тела. Это явление называется электризацией трением. Но, собственно говоря, почему надо думать, что такое свойство присуще лишь твердым телам? Не будут ли электризоваться капельки масла, которые мы будем впрыскивать в какую-либо камеру, — ведь, проходя через горлышко пульверизатора, масло будет подвергаться трению. Оказывается, так оно и есть. Чтобы убедиться в этом, надо приготовить в принципе очень несложную установку: направить струю масляных брызг в пространство между горизонтально расположенными обкладками конденсатора и приспособить микроскоп, который позволял бы следить за движением капель. Пока электрическое поле не подано, капельки, естественно, будут падать вниз под действием силы тяжести. Капельки легкие, поэтому сила тяжести почти немедленно уравнивается силой сопротивления возду-

ха и они будут падать равномерно. Но как только на пластины накладывается напряжение, картина меняется. Движение капли становится либо ускоренным, либо замедленным, в зависимости от направления электрического поля. Милликен выбирал такое направление поля, которое заставляло капельку двигаться медленнее. Постепенно увеличивая поле, ему удавалось, так сказать, подвесить каплю в воздухе. Целыми часами наблюдал исследователь за одной каплей. С помощью поля он мог управлять ее движением и останавливать по желанию.

Что же можно вычислить с помощью такого опыта? Сначала обсудим сведения, которые будут получены наблюдениями в отсутствие поля. Равенство сил тяжести и сопротивления воздуха может быть записано в такой форме:

$$mg = av.$$

Плотность масла легко определить независимыми опытами, диаметр капли измеряется микроскопом. Раз так, то масса капли вычисляется без труда. Падение капли происходит медленно, и, нанеся черточки на стекло микроскопа, мы с помощью секундомера найдем достаточно точно скорость падения капли v . Тогда из написанного выше уравнения находится коэффициент сопротивления a .

А теперь включим поле. Удобнее всего добиться такого положения вещей, чтобы капля начала равномерно подниматься. К двум силам, которые были, прибавилась третья — сила со стороны электрического поля, напряженность которого E нам известна (отношение напряжения к расстоянию между пластинами конденсатора). Равномерное движение вверх означает, что уравновесились три силы. Условие этого равновесия будет иметь вид:

$$qE - mg = av'.$$

Новое значение скорости v' измеряется тем же микроскопом. Итак, все величины, входящие в уравнение, известны, кроме величины заряда капли. Вычислим значение этого заряда и запишем его в тетрадь, которую обязательно ведет любой аккуратный экспериментатор.

Вот теперь мы подошли к главной выдумке. Ток в электролите, рассуждал Милликен, переносится иона-

ми разных знаков. Но ведь ионы можно образовать и в газе. Воздух ионизируется самыми разными приемами. Можно, например, всю установку поместить около рентгеновской трубки. Рентгеновские лучи ионизуют воздух. Это было превосходно известно в те времена. Но если капля заряжена, то она будет притягивать к себе ионы противоположного знака. Как только ион прилипнет к капле, заряд ее изменится. А как только заряд станет другим, то и капля изменит свою скорость, которую мы сразу же найдем новым измерением.

Наблюдения показали, что идея верна. После включения рентгеновской трубки разные капли то и дело скачком начинали менять свою скорость. Не спуская глаз с одной капли, наблюдатель мерил разности скоростей до и после включения рентгеновской трубки. По формуле, которую мы привели, сразу же вычислялись значения q .

Вы еще не поняли, для чего это делается? Но подумайте получше. Если существует элементарный электрический заряд, то измеренные величины должны быть равны ему, если к капле присоединился один одновалентный ион, или кратны величине элементарного заряда, если к капле прицепилось несколько ионов.

Проделав свои опыты для капель масла, воды, ртути и глицерина, меняя знаки заряда капель, Милликен заполнил свою тетрадь сотнями чисел значений q , и все они оказались кратными одной и той же величине, той самой, которая была найдена исследованиями электролиза.

После того как Милликен опубликовал свои результаты, даже у скептиков не осталось сомнения в том, что электрический заряд встречается в природе дискретными порциями. А ведь, строго говоря, и опыты Милликена не доказывают непосредственно существование электрона как частицы.

Но гипотезы опережают факты. В зернистой природе электричества кое-кто был уверен уже в начале девятнадцатого века. Заряд иона впервые рассчитал Стони в 1891 г. и он же предложил термин «электрон», но не для частицы, а для заряда одновалентного отрицательного иона. Опыты Томсона заставили подавляющее большинство физиков поверить в существование электрона как частицы. Друде первый недвусмысленно

определил электрон как частицу, несущую элементарный заряд отрицательного электричества.

Так что электрон получил признание до того, как его «увидели».

Прямым же доказательством существования электрона являются проделанные позже тонкие опыты. Слабый пучок частиц заставляют падать на экран и их можно сосчитать поодиночке. Каждый электрон дает вспышку на светящемся экране. Впрочем, уже давно для этой цели употребляются не светящиеся экраны, а специальные счетчики, называемые по имени их изобретателя счетчиками Гейгера. В двух словах идея этого счетчика заключается в том, что один электрон, как спусковой крючок револьвера, дает начало сильному импульсу тока, который легко зарегистрировать. Таким образом физик имеет возможность установить число электронов, приходящих в какую-либо ловушку за одну секунду. Если в качестве такой ловушки взять металлическую колбу, внутрь которой будут попадать электроны, то колба постепенно зарядится количеством электричества, достаточным для того, чтобы его можно было точно измерить. Для нахождения заряда электрона остается поделить количество электричества на число пойманных электронов.

Вот только после этого можно сказать: существование электрона перестало быть гипотезой. Это факт.

Со скоростью гоночного автомобиля мы пролетели мимо открытий, заложивших фундамент современной физики. Но такова уж их судьба! Новые дела теснят старые, и даже узловые события, происшедшие при строительстве храма науки, переходят в ведение историков.

Теперь, пожалуй, можно ответить на вопрос, что такое электричество. Электрический флюид — это поток электрических частиц. Тело электрически заряжено, если число частиц одного знака превосходит число частиц другого знака.

— Ну и объяснение, — негодует читатель. — А что такое электрическая частица?

— Разве не ясно? Частицы называются электрическими, если они взаимодействуют по закону Кулона.

— И все? — спрашивает с недоумением читатель.

— Все, — отвечает физик. — Все, касающееся ответа на ваш вопрос. Но впереди вас ждут ответы на мно-

гие другие интересные вопросы. Мы ведь не сказали, в каких случаях нас ждут встречи с элементарной частицей положительного электричества. Нам предстоит также узнать, что электрические частицы характеризуются не только зарядом и массой, но и другими свойствами.

Но сначала поведем разговор о структуре атома.

МОДЕЛЬ АТОМА

Как построен атом из электрических частиц? Ответ был получен с помощью лучей, испускаемых радием. Об этом замечательном веществе и о большом семействе естественных и искусственных радиоактивных элементов мы поговорим в четвертой книге. Пока нам надо знать, что радий непрерывно испускает жесткое электромагнитное излучение (гамма-лучи), поток электронов (в свое время называвшийся бета-лучами) и альфа-лучи, которые представляют собой двукратно заряженные ионы атома гелия.

Замечательный английский физик Эрнест Резерфорд (1871—1937) в 1911 г. предложил так называемую планетарную модель атома, к которой он пришел на основании тщательных исследований рассеяния альфа-частиц различными веществами. Резерфорд проводил опыты с фольгой золота, толщина которой составляла всего лишь одну десятую микрометра. Оказалось, что из 10 000 альфа-частиц лишь одна отклоняется на угол, превышающий 10 градусов.

В этих поразительных по простоте опытах фиксировалось прохождение каждой отдельной частицы. Разумеется, современная техника позволяет провести измерения совершенно автоматически.

Итак, сразу же становится ясным, что атомы в основном состоят... из пустоты. Редкие лобовые столкновения надо понимать так: внутри атома имеется положительно заряженное ядро. Около ядра расположены электроны. Они очень легкие и поэтому не составляют серьезного препятствия для альфа-частицы. Электроны тормозят альфа-частицу, но столкновение с каждым отдельным электроном не может отклонить частицу от ее пути.

Резерфорд допустил, что силы взаимодействия между одновременно заряженными ядром атома и альфа-частицей являются кулоновскими силами. Предположив далее, что масса атома сосредоточена в его ядре, он рассчитал вероятность отклонения частиц на заданный угол и получил блестящее совпадение теории с опытом.

Вот так физики и проверяют выдуманные ими модели.

— Модель предсказывает результаты опыта?

— Да.

— Значит, она отображает действительность?

— Ну, зачем же так резко. Модель объясняет ряд явлений — значит, она хороша. А ее уточнение — дело будущего...

Результаты опытов Резерфорда не оставляли сомнения в справедливости следующего утверждения: электроны под действием кулоновских сил движутся около ядра.

Из теории следовали и некоторые количественные оценки, которые подтвердились в дальнейшем. Размеры самых малых атомных ядер оказались равными примерно 10^{-13} см, в то время как размеры атома — порядка 10^{-8} см.

Сопоставляя результаты опыта с расчетами, оказалось возможным оценить и заряды сталкивающихся ядер. Эти оценки сыграли большую, если не основную, роль в трактовке периодического закона строения элементов.

Итак, модель атома построена. Но немедленно возникает следующий вопрос. Почему электроны (отрицательно заряженные частицы) не падают на ядро (заряженное положительно)? Почему атом устойчив?

Что же тут непонятного, скажет читатель. Ведь планеты не падают на Солнце. Сила электрического происхождения является, как и сила тяготения, центростремительной силой и обеспечивает круговое движение электронов около ядра.

Но в том-то и дело, что аналогия между планетной системой и атомом носит лишь поверхностный характер. Как мы узнаем позже, с точки зрения общих законов электромагнитного поля атом обязан излучать электромагнитные волны. А, впрочем, можно и не знать теорию электромагнетизма. Вещество, т. е. атомы,

способно излучать свет и тепло. Раз так, то атом теряет энергию, а значит электрон должен падать на ядро.

Каков же выход из положения? Он очень «прост»: надо примириться с фактами и возвести эти факты в ранг закона природы. Этот шаг и был сделан в 1913 г. великим физиком нашего столетия Нильсом Бором (1885—1962).

КВАНТОВАНИЕ ЭНЕРГИИ

Как и все первые шаги, этот шаг был относительно робким. Мы изложим новый закон природы, который не только спас атом Резерфорда, но и заставил нас прийти к выводу, что механика больших тел неприменима к частицам малой массы.

Природа устроена так, что ряд механических величин, таких, например, как момент импульса и как энергия, для любой системы взаимодействующих частиц не могут иметь непрерывный ряд значений. Напротив, атом, о котором у нас идет речь сейчас, или атомное ядро, о строении которого мы будем говорить позже, имеют свою, свойственную только данной системе последовательность энергетических уровней. Имеется наинизший уровень (нулевой). Энергия системы не может быть меньше этого значения. В случае атома это означает, что есть такое состояние, в котором электрон находится на некотором минимальном расстоянии от ядра.

Изменение энергии атома может происходить только скачком. Если скачок произошел «вверх», то это значит, что атом поглотил энергию. Если скачок произошел «вниз», то атом излучил энергию.

Мы увидим позже, как красиво с этих позиций расшифровываются спектры излучения различных систем.

Сформулированный закон называют законом квантования энергии. Можно также говорить, что энергия имеет квантовый характер.

Следует отметить, что закон о квантовании носит совершенно общий характер. Он применим не только к атому, но и к любому предмету, состоящему из миллиардов атомов. Но, имея дело с большими телами, мы можем зачастую «не заметить» квантования энергии.

Дело в том, что, грубо говоря, у предмета, состоящего из миллиарда миллиардов атомов, число энергетических уровней возрастает в миллиард миллиардов раз. Энергетические уровни будут расположены столь близко друг к другу, что практически сольются. Поэтому мы не заметим дискретности возможных значений энергии. Так что та механика, которую мы излагали в первой книге, практически не изменяется, когда речь идет о больших телах.

Во второй книге мы выяснили, что передача энергии от одного тела другому может произойти в форме работы и в форме тепла. Теперь мы в состоянии объяснить, в чем различие этих двух форм передачи энергии. При механическом воздействии (скажем, при сжатии) энергетические уровни системы смещаются. Смещение это очень незначительно и обнаруживается лишь тонкими опытами и лишь если давления достаточно велики. Что же касается теплового действия, то оно состоит в переводе системы с более низкого уровня энергии на более высокий (нагрев) или с высокого на более низкий (охлаждение).

Квантование энергии, так же как и других механических величин, является общим законом природы, из которого строго вытекают самые различные следствия, находящие подтверждение на опыте.

Может быть вы хотите спросить, почему энергия квантуется? На этот вопрос ответа нет. Так устроена природа! Всякое объяснение есть сведение частного факта к более общему. Мы сейчас не знаем ни одного утверждения настолько общего, чтобы из него, как следствие, вытекало квантование энергии. Конечно, в принципе не исключено, что в дальнейшем будут открыты столь широкие законы, что принципы квантовой механики окажутся их следствиями. Как бы то ни было, на сегодня закон квантования является одним из немногих великих законов природы, не нуждающихся в логическом обосновании. Энергия квантуется, потому что... квантуется.

В такой общей форме этот закон был установлен в 1925—1927 гг. трудами французского физика Луи де Бройля и немецких физиков Эрвина Шредингера и Вернера Гейзенберга. Учение, в основе которого лежит принцип квантования (да, я забыл сказать, что в пере-

воде на русский язык слово «квант» означает «порция»), получило название квантовой или волновой механики. А почему волновой? Об этом вы узнаете позже.

ПЕРИОДИЧЕСКИЙ ЗАКОН МЕНДЕЛЕЕВА

В 1868 г. великий русский химик Дмитрий Иванович Менделеев (1834—1907) опубликовал открытый им периодический закон следования химических элементов. Мы не станем приводить здесь таблицу Менделеева, которую читатель найдет в школьном учебнике химии. Напомним, что, расположив известные элементы в ряд по атомным весам, Менделеев заметил, что химические свойства и некоторые физические особенности элементов меняются периодически в зависимости от атомного веса.

В таблице, составленной Менделеевым, каждый из элементов принадлежит к одной из девяти групп и к одному из семи периодов. Элементы, принадлежащие к одной группе, Менделеев расположил в виде столбцов таким образом, чтобы те из них, символы которых располагались друг под другом, обладали бы одинаковыми химическими свойствами. Оказалось, что добиться этого можно было лишь в том случае, если предположить, что имеются еще неоткрытые элементы. Для них Менделеев оставил «пустые клеточки» в своей таблице. Прозорливость великого ученого проявилась и в том, что он поместил атом никеля на «надлежащее» место вслед за кобальтом, несмотря на то, что атомный вес кобальта несколько больше.

Некоторые «пустые клеточки» были заполнены еще при жизни Менделеева. Это принесло ему мировую славу, ибо всем стало ясно, что составление этой таблицы — не просто формальный акт, а открытие великого закона природы.

Смысл порядкового номера, который приписывает таблица химическому элементу, стал очевидным лишь после того, как у физиков не осталось сомнений в справедливости планетарной модели атома Резерфорда и законов квантования энергии. Каков же этот смысл? Ответ оказывается на редкость простым: порядковый номер равен числу электронов, вращающихся около ядра. Можно сказать и так: порядковый номер элемента —

это положительный заряд его ядра, выраженный в единицах заряда электрона.

Периодический закон Менделеева, принцип квантования энергии и изучение характеристических оптических и рентгеновских спектров атомов (о них мы расскажем попозже) позволили понять причину тождественного химического поведения атомов, стоящих в одном столбце таблицы Менделеева.

Энергия атома есть энергия взаимодействия электронов с ядром. Поскольку энергия квантуется, то логично было бы допустить, что электроны каждого атома можно расположить в ряд по энергиям. Первый электрон связан с ядром наиболее сильно, второй слабее, третий еще слабее и т. д., так что электроны атома расположены по энергетическим ступенькам. Логика нас не подводит, но опыт приводит к уточнению этой картины. Во-первых, оказывается, что каждую энергетическую ступеньку может занимать не один, а два электрона. Правда, эти электроны не одинаковы, а отличаются друг от друга свойством, которое называется «спином». Свойство это векторное. Так что любители наглядности могут представить себе, что на заполненной ступеньке находятся две «точечки», снабженные стрелками, — одна стрелка смотрит «вниз», а другая «вверх».

Само слово «спин» возникло следующим образом. Это английское слово, которое в переводе на русский язык означает «быстро вращаться». Чтобы представить себе, чем отличаются два электрона, сидящие на одной ступеньке, предлагалось думать, что один электрон вращается по, а другой — против часовой стрелки около своей собственной оси. Эта модель была подсказана поверхностным сходством атома и планетной системы. Раз электрон — нечто вроде планеты, то почему бы не разрешить ему вращаться около своей оси. Я должен очередной раз огорчить читателя: наглядно представить себе спин электрона — задача невозможная. А вот как его измерить, мы скажем в следующей главе.

Но это не единственное важное заключение (к которому нас привело внимательное изучение спектров атомов). Второе заключение состояло в том, что ступеньки энергии отстоят друг от друга на неравные расстояния и могут быть разбиты на группы.

За первой ступенькой, которую называют *K*-уровнем, следует энергетический разрыв и за ним группа из 8 электронов, обозначаемая буквой *L*, затем группа из 18 электронов, обозначаемая буквой *M*, ... Не будем описывать расположение уровней и порядок их заполнения для всех атомов. Картина оказывается не столь уж простой и описание ее потребовало бы много места. Детали в нашей маленькой книжке роли не играют, и про ступеньки я упомянул лишь для того, чтобы пояснить, в чем же сходство атомов, которые находятся друг под другом в таблице Менделеева. Оказывается, у них одинаковое число электронов на верхней группе ступенек.

Становится ясным химическое понятие валентности атома. Так, у лития, натрия, калия, рубидия, цезия и франция по одному электрону на верхней группе ступенек. У бериллия, магния, кальция и т. д. — по два электрона. Валентные электроны слабее всего связаны с атомом. Поэтому при ионизации атомов, стоящих в первом столбце, образуются легче всего однозарядные частицы. Ионы бериллия, магния и пр. несут на себе два заряда, и т. д.

ЭЛЕКТРИЧЕСКОЕ СТРОЕНИЕ МОЛЕКУЛ

Химики называют молекулой мельчайшего представителя вещества. Физики большей частью пользуются этим словом лишь в том случае, если этот мельчайший представитель реально существует как отдельное маленькое тело.

Существует ли молекула поваренной соли? Конечно, ответит химик, и напишет формулу: NaCl . Поваренная соль — это хлористый натрий. Молекула состоит из одного атома натрия и одного атома хлора. Однако этот ответ лишь формально справедлив. На самом же деле ни в кристаллике поваренной соли, ни в растворе соли в воде, ни в парах хлористого натрия мы не обнаруживаем пары атомов, которая вела бы себя как одно целое. Как мы говорили во второй книге, в кристаллике каждый атом натрия окружен шестью хлорными соседями. Все эти соседи равноправны, и никак нельзя сказать, какой из них «принадлежит» данному атому натрия.

Растворим поваренную соль в воде. Окажется, что раствор — превосходный проводник тока. Строгими опытами, о которых мы уже говорили, можно доказать, что электрический ток представляет собой поток отрицательно заряженных атомов хлора, движущихся в одну сторону, и поток положительно заряженных атомов натрия, движущихся в противоположную сторону. Так что при растворении атомы хлора и натрия также не образуют крепко связанную пару атомов.

После того как модель атома установлена, становится ясным, что анион хлора представляет собой атом хлора с «лишним» электроном, — напротив, катиону натрия «не достаёт» одного электрона.

Можно ли сделать отсюда вывод, что и твёрдое тело построено не из атомов, а из ионов? Да. Это доказывается многими опытами, на описании которых мы не станем останавливаться.

Ну, а пары хлористого натрия? И в парах мы не находим молекул. Пар хлористого натрия состоит из ионов или из различных очень неустойчивых групп ионов. О молекулах ионных соединений можно говорить лишь в химическом смысле этого слова.

Ионные соединения обязательно растворяются в воде. Такие растворы, классическим примером которых являются простые соли металлов вроде хлористого натрия, обладают хорошей проводимостью и поэтому называются сильными электролитами.

Приведем теперь несколько примеров веществ, которые построены из настоящих молекул — из молекул в физическом смысле этого слова. Это кислород, азот, углекислый газ, углеводороды, углеводы, стероиды, витамины... список можно было бы продолжать весьма долго.

Всекие классификации всегда несколько условны. Поэтому я должен предупредить читателя, что иногда мы сталкиваемся и с такими случаями, когда в одном агрегатном состоянии вещество состоит из физических молекул, а в других — нет. К таким веществам относится такое важное, как вода. Молекулы водяного пара несомненно отдельные тельца. А вот в кристаллах льда «оконтурить» одну молекулу и сказать, что вот этот атом водорода связан только с вот тем атомом кислорода, уже трудновато.

Как бы то ни было, класс молекулярных кристаллов весьма обширен.

Во второй книге мы уже говорили о том, как построены молекулярные кристаллы. Напомним, что в кристалле углекислого газа, формула которого CO_2 , атом углерода имеет двух очень близких кислородных соседей. И во всех остальных случаях, изучая структуру молекулярного кристалла, мы сразу же видим, что имеется возможность разбить кристалл на тесно расположенные группы атомов.

Раз они тесно расположены, значит и связаны большими силами. Так оно и есть. Грубо говоря, силы, связывающие атомы, принадлежащие одной молекуле, в сто, а то и в тысячу раз больше сил, действующих между атомами соседних молекул.

В чем же состоит внутримолекулярная связь? Достаточно ясно, что представлениями о притяжении электрически заряженных отрицательных и положительных ионов обойтись не удастся. Ведь существуют молекулы кислорода, азота, водорода, построенные из одинаковых атомов. Невозможно предположить, что один теряет, а другой приобретает электрон. С какой стати электрон должен предпочесть пребывание около одного из двух одинаковых атомов.

Объяснение сущности внутримолекулярной связи пришло лишь вместе с квантовой механикой. Мы только что сказали читателю, что энергия любой системы квантуется, сообщили, что на одном уровне энергии могут находиться два электрона с противоположно направленными «спинами». Далее, из основных гипотез квантовой механики вытекает одно интересное следствие. Оказывается (это уже не гипотеза, а строгий математический вывод, который мы не приводим из-за его сложности), что самое низкое значение энергии, которое может принять электрон, определяется размерами области, внутри которой он движется. Чем больше эти размеры, тем энергия этого «нулевого уровня» ниже.

Теперь представьте себе, что два атома водорода приближаются друг к другу. Если они объединяются в одну систему, то «квартира» для каждого электрона станет примерно в два раза больше. В одной и той же квартире могут мирно ужиться два электрона с противоположно направленными спинами. Следовательно,

такое сожительство выгодно. Область существования для обоих электронов возросла. Значит суммарная энергия системы после объединения двух атомов в одно целое понизилась. Ну, а то, что любая система — если есть на то возможность — стремится перейти в состояние с наинизшей энергией, нам превосходно известно. По этой самой причине предоставленный сам себе шар скатывается с горки.

Итак, образование химической связи означает обобществление электронов. Имеется некоторое количество электронов (их называют внутренними), которые вращаются около ядер атомов, но некоторые электроны (их называют внешними) охватывают в своем движении по крайней мере пару ближайших атомов, а то и путешествуют по всем атомам молекулы.

Вещество, построенное из молекул, мы узнаем по его электрическим свойствам. Раствор такого вещества тока не проводит. Молекулы не распадаются на части, а целая молекула электрически нейтральна. В жидкостях и парах молекулы сохраняют свою структуру — вся группа атомов движется как одно целое, перемещается поступательно, вращается. Атомы, принадлежащие одной молекуле, могут лишь колебаться около своих положений равновесия.

Нейтральная молекула не несет на себе электрического заряда. Но не торопитесь делать заключение, что такая молекула не создает электрического поля. Если молекула несимметрична, то центры тяжести ее положительного и отрицательного зарядов наверняка совпадать не будут. Интуитивно ясно, что совпадение центров тяжести зарядов обоих знаков будет иметь место в таких молекулах, как кислород или азот, состоящих из двух одинаковых атомов. Также нетрудно поверить, что в такой молекуле, как, например, молекула угарного газа CO , эти центры могут быть сдвинуты друг относительно друга. Если такое смещение есть, то про молекулу говорят: она обладает дипольным моментом.

Термин имеет следующее происхождение: «дипольная» молекула ведет себя как система двух точечных зарядов (одна точка — центр тяжести отрицательных, а другая — центр тяжести положительных зарядов). Диполь характеризуется величиной заряда и «плечом» диполя, т. е. расстоянием между центрами.

Не требуйте от меня доказательства, что несимметричная молекула обладает электрическим дипольным моментом. Можно не тратить время на теоретические рассуждения потому, что наличие постоянного (или, как еще говорят, жесткого) дипольного момента без труда доказывается на опыте.

ДИЭЛЕКТРИКИ

Между понятиями диэлектрик, непроводник тока и изолятор можно ставить знаки равенства.

К диэлектрикам относятся молекулярные газы, молекулярные жидкости, растворы твердых тел, построенных из молекул. Твердыми диэлектриками являются стекла, как органические, так и неорганические (силикатные, боратные и пр.), полимерные вещества, построенные из макромолекул, пластические массы, молекулярные кристаллы, а также ионные кристаллы.

Мы напомнили читателю в первой главе, что емкость конденсатора возрастает, если в пространство между пластинами внести любой диэлектрик. Представьте себе, что конденсатор подсоединен к источнику постоянного напряжения. Емкость возросла, но ведь напряжение осталось прежним. Значит к обкладкам конденсатора подошел дополнительный заряд. Казалось бы, напряженность поля должна была при этом возрасти. Но напряженность поля не изменилась: ведь она равна частному от деления напряжения на расстояние между пластинами. Как выйти из противоречия? Единственным способом: приходится допустить, что в изоляторе возникло электрическое поле противоположного направления. Это явление носит название поляризации диэлектрика.

Что же это за особенные заряды, которые возникают внутри диэлектрика? Как понять неудачу попыток «отвести» в Землю заряд диэлектрика? Даже не зная ничего об электрическом строении вещества, мы можем сказать, что эти заряды «связанные», а не свободные, как в металле. Располагая же сведениями о строении молекул, мы сумеем исчерпывающим образом объяснить сущность явления поляризации, объяснить механизм образования «противополя», которое при прочих равных условиях тем больше, чем больше ϵ .

Прежде всего надо ответить на вопрос, что может сделать электрическое поле с атомом и молекулой. Под действием электрического поля электроны нейтрального атома и иона могут сдвинуться в сторону, противоположную полю. Атом или ион превращается в диполь и создает поле противоположного направления. Так что поляризация вещества обусловлена поляризацией атомов, ионов или молекул, из которых оно построено.

Механизм поляризации, который мы описали, называется процессом создания мягких диполей. Если поля нет, то нет и диполей. Чем больше поле, тем больше смещение центра тяжести электронов, тем больше «наведенный» дипольный момент, тем больше поляризация.

Образование мягких диполей от температуры зависеть не может. Опыт показывает, что есть диэлектрики, на которые температура не влияет. Значит для них описанный механизм справедлив.

Ну, а что же придумать для тех случаев, когда имеется явная зависимость диэлектрической проницаемости от температуры? Внимательные исследования связи структуры молекулы с поведением вещества в электрическом поле, а также характер температурной зависимости ϵ (всегда поляризация падает с ростом температуры) приводят нас к следующей мысли. Если молекулы и в отсутствие поля обладают дипольным моментом («жесткие» диполи) и могут менять свою ориентацию, то это объяснит температурную зависимость диэлектрической проницаемости.

Действительно, в отсутствие поля молекулы расположены «как попало». Дипольные моменты складываются геометрически. Поэтому для объема, содержащего много молекул, результирующий момент будет равен нулю. Электрическое поле «причесывает» молекулы, заставляет их смотреть преимущественно в одну сторону. В противоборство вступают две силы: тепловое движение, которое вносит беспорядок в расположение молекул, и упорядочивающее действие поля. Понятно, что чем выше температура, тем труднее полю «справиться» с молекулами. Отсюда и следует, что диэлектрическая проницаемость у таких веществ должна падать с уменьшением температуры.

Для лучшего запоминания сказанного приводится рис. 2.2. Верхний рисунок показывает, что поляриза-

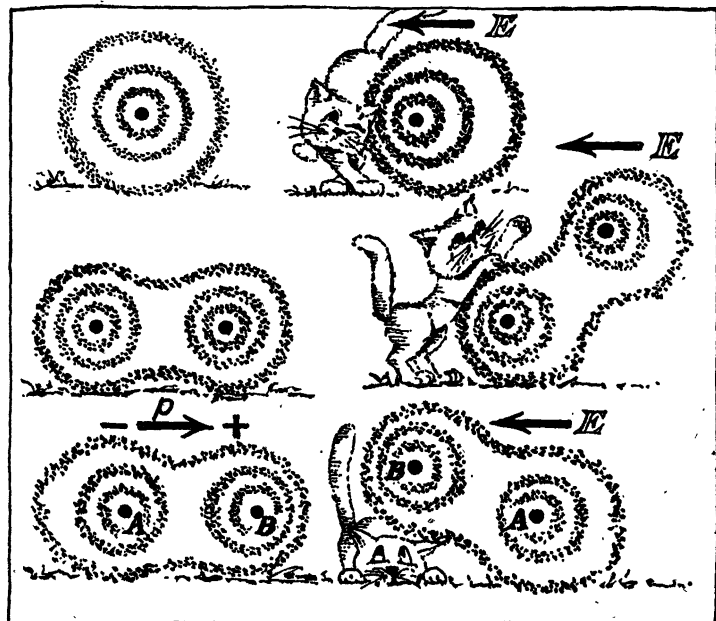


Рис. 2.2.

ция атома сводится к смещению и деформации электронных оболочек. Чем дальше расположен электрон от атома, тем больше скажется на нем действие поля. Слои, изображенные на этих схематических рисунках точками, символизируют места пребывания электронов. Надо помнить, что картина имеет весьма условный характер, так как разные электроны имеют в молекулах разные по форме области существования (ср. стр. 102).

На среднем рисунке показано поведение симметричной двухатомной молекулы. В отсутствие поля она не обладает моментом. Поле наводит электрический момент. Он может быть разным по величине в зависимости от того, под каким углом молекула расположена по отношению к полю. Момент образуется благодаря деформации электронных оболочек.

Наконец, на нижней схеме показано поведение молекулы, обладающей дипольным моментом и в отсутствие поля. На нашей схеме молекула лишь поверну-

лась. Однако в общем случае у веществ, молекулы которых обладают моментом в отсутствие поля, будут присутствовать оба механизма поляризации: наряду с поворотами молекул могут происходить и смещения электронов. Эти два эффекта нетрудно разделить, производя измерения при очень низких температурах, когда влияние теплового движения практически отсутствует.

Если эта модель справедлива, то мы не должны наблюдать температурную зависимость диэлектрической проницаемости у веществ, молекулы которых симметричны, например таких, как молекула кислорода или хлора. Если же двухатомная молекула состоит из двух разных атомов, как, например, молекула угарного газа CO , то в этом случае зависимость ϵ от температуры должна иметь место. Так оно и есть на самом деле. К молекулам с очень значительным дипольным моментом относится нитробензол.

Что будет происходить с обычным диэлектриком при увеличении электрического поля E ? Очевидно, должна увеличиваться поляризация вещества. Это происходит за счет растяжения диполей: в атоме это сдвиг электронного облака относительно ядра, в молекуле это может быть удаление друг от друга двух ионов. Как бы то ни было, естественно задать вопрос, до каких пор электрон, оттянутый полем далеко от ядра, является по-прежнему электроном атома, а два иона, находящиеся уже достаточно далеко друг от друга, образуют по-прежнему молекулу. Предел безусловно существует, и при достаточной напряженности E происходит так называемый пробой диэлектрика. Порядок этой напряженности — несколько тысяч киловольт на метр. В любом случае пробой связан с высвобождением электронов или ионов, т. е. созданием свободных носителей тока. Диэлектрик перестает быть диэлектриком, по нему течет электрический ток.

С явлением пробоя чаще всего приходится сталкиваться, когда выходит из строя конденсатор в телевизоре или радиоприемнике. Однако мы знаем и другие примеры пробоя — электрические разряды в газах. Об электрическом разряде в газах мы поговорим особо. А сейчас познакомимся с двумя важными членами семейства диэлектриков — пьезоэлектриками и сегнетоэлектриками.

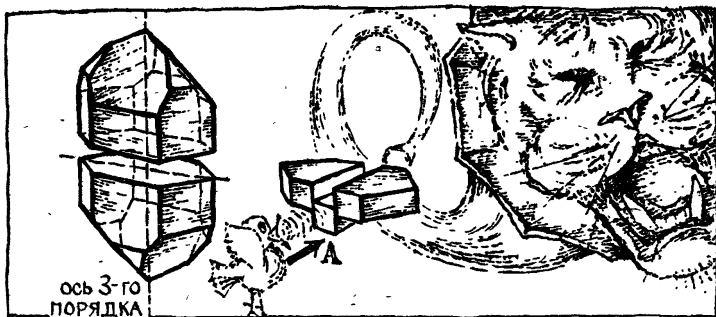


Рис. 2.3.

Главным представителем класса пьезоэлектриков является кварц. Члены этого класса (к нему принадлежат, кроме кварца, к примеру, сахар и турмалин) должны обладать определенной симметрией. На рис. 2.3 изображен кристалл кварца. Главная ось этого кристалла — ось симметрии 3-го порядка. В перпендикулярной плоскости лежат три оси 2-го порядка.

Указанным на рисунке способом из кристалла вырезают пластинку толщиной около 2 см. Мы видим, что она перпендикулярна главной оси, а оси 2-го порядка лежат в ее плоскости. Затем из этой толстой пластинки перпендикулярно одной из осей 2-го порядка вырезают тонкую пластинку толщиной около 0,5 мм. С полученной таким образом тонкой пьезоэлектрической пластинкой (на рисунке справа она сдвинута вниз) можно произвести интересные опыты.

Сдавим пластинку вдоль направления А, перпендикулярного осям симметрии, а к боковым плоскостям пластинки присоединим электрометр — прибор, обнаруживающий электрический заряд (для того чтобы был электрический контакт, эти плоскости надо посеребрить). Оказывается, что под действием сжатия на гранях пластинки появляются разноименные заряды. Если вместо сжатия применяется растяжение, то заряды меняют знаки: там, где при сжатии возникал положительный заряд, при растяжении возникает отрицательный, и наоборот. Вот это явление — возникновение электрических зарядов под действием давления или растяжения — получило название пьезоэлектричества.

Пьезокварцевые устройства чрезвычайно чутки: электрические приборы позволяют измерять заряды, появляющиеся на кварце при самой ничтожной силе, которую другими способами мы не можем измерить. Пьезокварц способен также отмечать очень быстрые изменения давления, что недоступно другим измерительным приборам. Поэтому описанное нами явление имеет огромное практическое значение как способ электрической регистрации всякого рода механических действий, в том числе звуков. Достаточно легко дунуть на пьезокварцевую пластинку — и электрический прибор откликнется.

Пьезокварцевые пластинки применяют в медицине — ими выслушивают шумы в сердце человека. Подобным же образом их применяют в технике, проверяя работу машин: нет ли каких-либо «подозрительных» шумов.

Кварц, как источник пьезоэффекта, применяется в звукозаписывающих аппаратах и проигрывателях. Движение иглы по бороздке пластинки вызывает сжатие пьезокристалла, которое в свою очередь приводит к возникновению электрического сигнала. Электрический ток усиливается, подается на динамики и превращается в звук.

До сих пор речь шла о веществах, электрическая поляризация которых создается электрическим полем, а также (изредка) механической деформацией. Если внешнее действие снято, то вещество становится электрически нейтральным. Однако наряду с этим распространенным поведением приходится сталкиваться с особыми телами, которые обладают суммарным электрическим моментом в отсутствие внешних сил. Ясно, что таких тел мы не найдем среди жидкостей и газов, ибо тепловое движение, которому не противостоит упорядочивающее действие поля, неминуемо приведет к беспорядку в расположении дипольных молекул. Однако можно представить себе кристаллы, расположение атомов в которых таково, что центры тяжести анионов и катионов внутри каждой элементарной ячейки смещены одинаково. Тогда все дипольные моменты смотрят в одну сторону. В этом случае можно было бы ожидать предельно возможной поляризации, а значит огромного значения диэлектрической проницаемости.

Такие кристаллы имеются. Явление было впервые открыто на кристаллах сегнетовой соли, и поэтому класс

подобных веществ получил название сегнетоэлектриков.

Очень большое практическое значение среди сегнетоэлектриков имеет титанат бария. На его примере мы и рассмотрим исключительно своеобразное поведение этого класса веществ.

Элементарная ячейка кристалла показана на рис. 2.4. Вершина ячейки выбрана в атомах бария. Маленькие светлые кружки — это анионы кислорода, а большой кружок в центре — это катион титана.

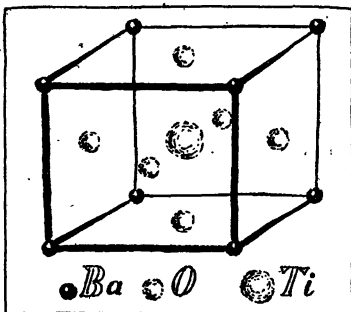


Рис. 2.4.

Рисунок выглядит так, как если бы ячейка была кубической. Строго кубическая ячейка действительно существует, но лишь при температуре выше 120°C . Ясно, что кубическая ячейка симметрична и дипольным моментом обладать не может. Поэтому выше этой температуры, которую называют точкой Кюри, особые свойства титаната бария пропадают. Выше этой температуры он ведет себя, как обычный диэлектрик.

При снижении температуры ниже 120°C происходит смещение ионов кислорода и титана в противоположные стороны на величину порядка $0,1$ ангстрема. Ячейка приобретает дипольный момент.

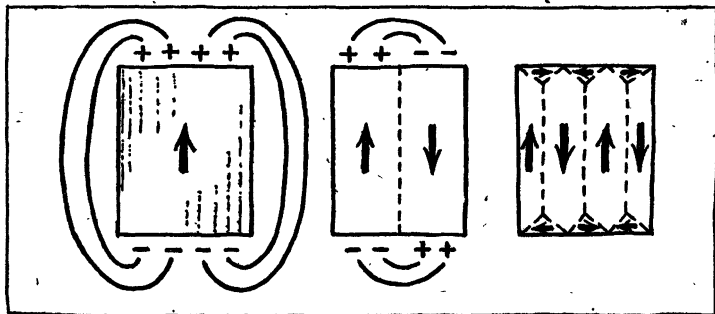


Рис. 2.5.

Обратите внимание на следующее важнейшее обстоятельство. Это смещение может с одинаковым успехом произойти в трех направлениях — вдоль трех осей куба. Смещения приводят к деформациям ячеек. Поэтому не всякое разбиение кристалла на области, внутри которых дипольные моменты направлены в одну и ту же сторону, оказывается выгодным.

На рис. 2.5 показаны возможные разбиения кристалла на идеально поляризованные области (они называются доменами). Наряду со случаем, когда весь кристалл является одним доменом, — случаем, приводящим к максимальному электрическому полю, — возможны варианты менее выгодные и, наконец, даже такие (крайний правый рисунок), когда внешнее поле оказывается равным нулю.

Как ведет себя сегнетоэлектрик при наложении внешнего электрического поля? Оказывается, механизм поляризации заключается в росте домена, смотрящего в «нужном» направлении, путем смещения границ. Домены, ориентированные своим моментом под острым углом к полю, «поедают» домены, ориентированные к полю под тупым углом. При очень больших полях может наблюдаться и переворачивание доменов.

Титанат бария является основным промышленным сегнетоэлектриком. Он получается при обжиге двух порошков — двуокиси титана и углекислого бария. Получается своего рода керамика.

Керамические сегнетоэлектрики нашли широкое применение в электротехнике и радиотехнике. Мало того, что они резко увеличивают диэлектрическую проницаемость конденсаторов. У этих веществ, как нам понятно из описания механизма поляризации, значение ϵ будет расти с возрастанием напряженности электрического поля. Конденсатор превращается в «вариконд» — переменный конденсатор, с помощью которого легче всего осуществляется частотная модуляция. Это процесс, происходящий во всяком радиоприемнике и телевизоре.

Во многих случаях сегнетоэлектрическая керамика вытесняет кварц. С ее помощью можно создать более сильный звук. Так же точно и коэффициент усиления ультразвука в этом случае выше. Область, в которой

кварц не имеет соперников, это стабилизация радиочастоты.

Подавляющее большинство глав об электричестве начинается с рассказа об электрических зарядах, создаваемых трением на стеклянной и эбонитовой палочках. Объяснение этого явления обычно обходится. А почему?

Прежде всего нужно подчеркнуть, что электризация диэлектриков путем трения не связана (во всяком случае непосредственно) с поляризацией изоляторов, о которой мы только что вели речь. Действительно, явление поляризации — это образование связанных электрических зарядов, которые тем и особенные, что их нельзя «отвести» от диэлектрика. Заряды, которые создаются на стекле и эбоните путем трения кошачьим мехом, без сомнения свободные заряды и, конечно, это электроны.

В общих чертах картина более или менее ясна, но и только. Видимо, то мизерное количество свободных электронов, которое имеется у изолятора, связано с его молекулами разными силами у разных диэлектриков. Поэтому, если привести в тесное соприкосновение два тела, то электроны перейдут с одного из них на другое. Произойдет электризация. Однако «тесное соприкосновение» — это приведение поверхностей на расстояние, равное межатомному. Поскольку атомно-гладких поверхностей в природе не существует, трение помогает ликвидировать всякого рода выступы и увеличивает площадь, так сказать, истинного соприкосновения.

Переход электронов от одного тела к другому имеет место для любой пары тел — металлов, полупроводников и изоляторов. Наэлектризовать же удастся только изоляторы, ибо лишь в этих телах возникшие заряды остаются в тех местах, куда они перебрались от одного тела к другому.

Я не могу сказать, чтобы эта теория оставляла чувство глубокого удовлетворения. Неясно, чем так хороши эбонит, стекло, кошачий мех. Можно задать еще кучу вопросов, на которые нет вразумительного ответа.

ПРОВОДИМОСТЬ ГАЗОВ

Если заполнить стеклянную трубку газом, впаять в трубку электроды и приложить к ним напряжение, то мы получим в свое распоряжение простую установку, с помощью которой можно приступить к изучению проводимости газов. Можно варьировать вещество, через которое проходит ток, менять давление газа, менять напряжение.

Исследования проводимости газов сыграли огромную роль в развитии наших представлений об электрическом строении материи. Основные работы были проведены в девятнадцатом веке.

На рис. 2.6 приводятся трубки различной формы, с помощью которых ученые изучали явления, о которых идет речь. Поскольку все древние скульптуры и картины давно раскуплены, продавцы старины перешли на лабораторное оборудование, и в современных западных антикварных магазинах можно приобрести (и за далеко не малую цену) один из редких экземпляров, показанных на рисунке.

Электрический ток в газах возникает по той причине, что нейтральные молекулы разламываются на анионы и катионы. Кроме того от молекул или атомов может отрываться электрон. Ток создается пучком положительных ионов и пучками отрицательных ионов и электронов, движущихся в обратную сторону.

Чтобы газ стал проводником тока, нужно нейтральные молекулы или атомы превратить в заряженные

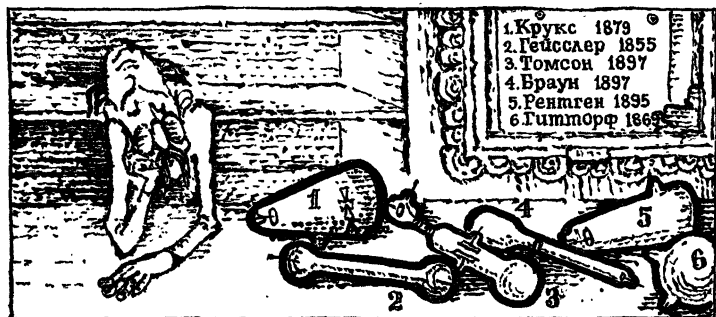


Рис. 2.6.

частицы. Этот процесс может произойти под действием внешнего ионизатора, а также благодаря соударению частиц газа. К внешним источникам ионизации относятся, как упоминалось, ультрафиолетовые, рентгеновские, космические, радиоактивные лучи. Высокая температура также приводит к ионизации газа.

Прохождение тока через газы часто сопровождается световыми эффектами. В зависимости от вещества, давления и напряжения свечение имеет разный характер. Изучение этого свечения также сыграло большую роль в истории развития физики, а именно послужило источником сведений об уровнях энергии атомов и закономерностях электромагнитного излучения.

Проводимость газа не подчиняется закону Ома. Она характеризуется кривой зависимости силы тока от напряжения. Эту кривую называют (не только в случае газов, но и для любых проводящих систем, не подчиняющихся закону Ома) вольт-амперной характеристикой.

Рассмотрим характерные для всякого газа явления, происходящие при увеличении напряжения, накладываемого на газоразрядную трубку. Поведение газа, к описанию которого мы переходим, имеет место в широком интервале давлений. Мы оставляем в стороне лишь такие малые давления, при которых свободный пробег молекул становится соизмеримым с размерами газоразрядной трубки. Наше рассмотрение также не относится к столь большим давлениям, при которых плотность газов приближается к плотности жидкостей.

Итак, наложим на газоразрядную трубку небольшое напряжение. Если ионизатор отсутствует, ток через трубку не пойдет. В присутствии ионизатора в газе находятся заряженные частицы — ионы и электроны. При наложении поля частицы будут направляться полем к электродам. Быстрота, с которой заряженные частицы будут передвигаться по направлению к электродам, зависит от многих обстоятельств и прежде всего от напряженности поля и давления газа.

На упорядоченное движение ионов и электронов, происходящее под действием постоянной электрической силы, накладывается хаотическое движение. Разгоняемая электрическим полем частица пробегает небольшое расстояние. Короткий пробег неминуемо заканчивается

соударением. При небольших скоростях движения эти столкновения происходят по закону упругого удара.

Средняя длина свободного пробега определяется прежде всего давлением газа. Чем выше давление, тем короче свободный пробег, тем меньше средняя скорость упорядоченного движения частицы. Напряжение, наложенное на газоразрядную трубку, действует в обратном направлении — увеличивает среднюю скорость упорядоченного движения частиц.

Если бы на трубку не было наложено напряжение, то в газе разыгрались бы следующие события: ионизатор создавал бы ионы, а ионы разного знака при встрече друг с другом воссоединялись или, как говорят, рекомбинировали бы друг с другом. Так как при рекомбинации встречается пара частиц, то скорость рекомбинации будет пропорциональна квадрату числа частиц.

При постоянном действии ионизатора между двумя процессами установится равновесие. Так обстоит дело в окружающей наш земной шар ионосфере. В зависимости от времени суток и года число ионизованных частиц в одном кубическом сантиметре колеблется от миллиона до ста миллионов электронов и ионов. Так что степень ионизации есть величина порядка одного процента (вспомните, сколько молекул воздуха находится в единице объема на больших высотах).

Вернемся к ионизованному газу в трубке под электрическим напряжением. Разумеется, оно нарушает равновесие, ибо часть ионов достигает электродов, не успев рекомбинировать. По мере увеличения напряже-

ния все большая и большая часть создаваемых и ионов достигает электродов, электрический ток через газ растет. Так продолжается до тех пор, пока совсем не останется времени для рекомбинации при этом все ионы, создаваемые ионизаторами, доходят до электродов. Ясно, что дальнейшее увеличе-

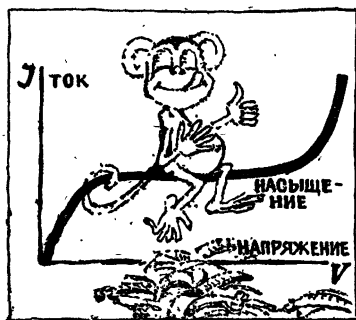


Рис. 2.7.

ние напряжения не может увеличить тока (ток насыщения, плато на рис. 2.7).

Чем меньше плотность газа, тем при меньших напряжениях поля будет достигнут ток насыщения.

Сила тока насыщения равна заряду ионов, образуемых ионизатором за секунду в объеме трубки. Обычно токи насыщения невелики — порядка микроампер и меньше. Конечно, их величина зависит от того, сколько разрушающих снарядов получает газ от ионизатора.

Если работать в режиме вольт-амперной характеристики, не выходящем за пределы тока насыщения, и защитить газ от действия внешнего ионизатора, то ток прекратится. В этом случае говорят о несамостоятельном газовом разряде.

При дальнейшем увеличении напряжения возникают новые явления. В некоторый момент скорость электронов становится достаточной для выбивания электронов из нейтральных атомов и молекул. Напряжение на трубке должно при этом достигнуть такого значения, при котором электрон успевает набрать на длине свободного пробега энергию, достаточную для ионизации молекулы. Возникновение ударной ионизации сказывается на кривой зависимости тока от напряжения: ток начинает расти, поскольку увеличение напряжения означает увеличение скорости движения электрона. Увеличение же скорости влечет за собой увеличение ионизирующей способности электрона, а следовательно, создание большого числа пар ионов и увеличение силы тока. Кривая вольт-амперной характеристики быстро вздымается кверху. По сравнению с током насыщения сила тока увеличивается в сотни и тысячи раз. Газ начинает светиться.

Если теперь устранить действие внешнего ионизатора, то ток не прекратится. Мы перешли в область самостоятельного разряда. Напряжение, при котором происходит это качественное изменение, называют напряжением пробоя или напряжением зажигания газового разряда.

Резкое возрастание тока после перехода этого критического предела объясняется лавинообразным увеличением числа зарядов. Один образовавшийся электрон разрушает нейтральную молекулу и создает два

заряда такой большой энергии, что они способны разбить другую пару молекул, попавшуюся им по дороге. Из двух зарядов образуются четыре, из четырех восемь... Согласитесь, что название «лавины» вполне оправдано.

Создана количественная теория, которая неплохо предсказывает вид вольт-амперных характеристик газов.

САМОСТОЯТЕЛЬНЫЙ РАЗРЯД

Существует много разновидностей этого разряда. Мы остановимся лишь на некоторых из них.

И с к р о в о й р а з р я д. Искру, проскакивающую через воздух между двумя электродами, нетрудно наблюдать в самых элементарных опытах. Для этого надо поднести друг к другу провода, находящиеся под напряжением, достаточно близко друг к другу. Что значит «достаточно»? Если речь идет о воздухе, то для этого требуется создать напряженность поля, равную 30 тысячам вольт на один сантиметр. Значит при маленьком расстоянии в один миллиметр достаточно разности потенциалов в 300 вольт. Небольшие искры каждый из читателей неоднократно наблюдал в житейской практике, возясь с неисправной электропроводкой или случайно приблизив друг к другу два провода, идущие от аккумулятора (тут уже надо сблизить провода на толщину бритвенного лезвия).

Напряжение пробоя зависит от плотности газа. Играет роль и форма электродов.

Искра пробивает не только газ, но также и диэлектрические жидкости и твердые тела. Электротехнику важно знать пробойные напряжения всех материалов, которыми он оперирует.

Сейчас нам кажется совершенно очевидным, что молния — это искра, которая проскакивает между двумя облаками, заряженными электричеством разных знаков. Однако в свое время физики (Михаил Васильевич Ломоносов (1711—1765), Бенджамин Франклин (1706—1790)) положили немало сил для доказательства этого утверждения. А Георг Рихман (1711—1753), работавший вместе с Ломоносовым, поплатился

своей жизнью при попытке отвести молнию в Землю через проводящую ток бечевку — хвост воздушного змея, запущенного в небо во время грозы.

Можно привести интересные цифры, характеризующие искровой разряд в молнии. Напряжение между облаком и Землей 10^8 — 10^9 вольт, сила тока колеблется от десятков до сотен тысяч ампер, диаметр светящегося канала 10—20 сантиметров.

Длительность вспышки молнии невелика — порядка микросекунды. Нетрудно прикинуть, что количества электричества, пробегающие по каналу молнии, относительно малы.

При помощи киносъемки небесные искры хорошо изучены. Очень часто молния представляет собой ряд искровых разрядов, следующих по одному пути. У молнии есть своего рода «лидер», который пробивает наиболее удобную, всегда причудливо разветвленную дорогу для электрических зарядов.

Часто наблюдались шаровые молнии. К сожалению, их не удастся воспроизвести в лабораторных условиях. Это светящиеся шары газовой плазмы диаметром 10—20 см. Они медленно двигаются, а иногда и стоят на месте. Существуют они несколько секунд, а то и минут, а затем исчезают с сильным взрывом. Признаемся, что до сих пор еще не предложена исчерпывающая теория этого интересного явления.

Д у г о в о й р а з р я д . Его получил впервые В. В. Петров еще в 1802 г. Для этой цели он приводил в соприкосновение два куска угля, к которым был подведен мощный источник напряжения, а затем раздвигал электроды. Этот прием сохранился и по сей день. Правда, сейчас используют специальные угли, которые изготавливаются из прессованного графитового порошка. Положительный уголь сгорает быстрее отрицательного. Поэтому по внешнему виду сразу же можно определить, к какому из углей подведен положительный полюс: на конце этого электрода образуется углубление — кратер. Температура кратера в воздухе при обычном давлении доходит до 4000 градусов, а если повысить давление, то температуру дуги можно довести почти до 6000 градусов, т. е. до температуры поверхности Солнца. Дуга между металлическими электродами дает пламя, температура которого значительно ниже.

Для поддержания дугового разряда нужно небольшое напряжение порядка 40—50 вольт. Ток может достигать сотен ампер, поскольку сопротивление светящегося газового столба невелико.

Как же объяснить большую электропроводность газа при столь малых напряжениях? Молекулы разгоняются до небольших скоростей, и их соударения не могут играть роль в возникновении сильного тока. Объяснение таково: в первый момент в месте контакта происходит сильный разогрев. Благодаря этому начинается процесс термоэлектронной эмиссии — катод выбрасывает большое число электронов. Отсюда, кстати, следует, что важна высокая температура только катода, анод может быть холодным.

Механизм дугового разряда этого типа совсем не тот, что в искровом разряде.

Читателю, наверное, можно не напоминать, сколь велико значение этого явления на практике. Дуговой разряд используется при сварке и резании металлов, а также в электрометаллургии.

Г л е ю щ и й р а з р я д. Этот вид самостоятельного разряда также имеет большое практическое значение, так как происходит в газосветных трубках, или, как их еще называют, лампах дневного света. Трубка конструируется и наполняется газом (давление существенно меньше атмосферного) так, чтобы обеспечить ее работу в условиях напряжения, превосходящего напряжение зажигания. Электрический ток в газосветных трубках создается ионизацией молекул электронами, а также тем, что из катода трубки выбиваются электроны. Газосветная трубка зажигается не сразу. Это происходит, видимо, по той причине, что первый толчок должен быть получен от небольшого количества заряженных частиц, которые всегда присутствуют в любом газе.

К о р о н н ы й р а з р я д. Он наблюдается при атмосферном давлении в сильно неоднородном поле, например вблизи проволоки или заострений. Напряженности должны быть высокими: порядка миллионов вольт на метр. Какой полюс подведен к острию — безразлично. Так что может существовать как положительная, так и отрицательная корона. Так как напряженность поля уменьшается с удалением от острия, то

корона на небольшом расстоянии пропадает. Можно сказать, что коронный разряд — это неполный пробой газового промежутка. Корона осуществляется электронными лавинами, которые движутся либо к острию, либо от острия во внешнее пространство. Разумеется, в области короны наряду с электронами существуют отрицательные и положительные ионы — продукты разрушения нейтральных молекул воздуха. Корона светится лишь в том небольшом участке около острия, внутри которого существует электронная лавина.

Атмосферные условия и прежде всего влажность влияют на возникновение короны.

Атмосферное электрическое поле может привести к свечению вершук деревьев, корабельных мачт. В старину это явление получило название огней святого Эльма. Их возникновение считалось дурной приметой. Можно найти тому рациональное объяснение: вполне возможно, что свечение возникает как раз тогда, когда близится шторм или буря.

Поучительная история произошла совсем недавно. Двое исследователей-любителей супруги Кирлиан уже много лет изучали следующее явление. Человек кладет руку, присоединенную к источнику высокого напряжения, на фотопленку, отделенную слоем изолятора от второго электрода этой цепи тока. При включении напряжения на фотопленке создается размытая картина ладони и пальцев руки. Происхождение снимка объясняется возникновением коронного разряда. Естественно, напряжение должно быть меньше того, при котором возможен искровой пробой.

Эти опыты привлекли большое внимание специалистов в области так называемой парапсихологии — учения, которое подавляющее большинство физиков и психологов рассматривает как лженауку. Внимание объясняется тем, что авторы открытия и их последователи связывали вид фотографии с психическим состоянием субъекта.

Широкая пропаганда столь экстравагантной трактовки этих опытов привела к тому, что группа физиков и психологов, работающих в университетах США, решила тщательно их проверить и объяснить более просто тот несомненный факт, что вид фотографий, получаемых этим способом, действительно различен у разных

лиц и даже у одного человека при различных условиях получения снимка.

Исследователи пришли к выводу: «Фотографии, получаемые методом Кирлиана, в основном представляют собой изображение коронного разряда, происходящего во время экспозиции. Большинство различий в виде фотографий объясняется влажностью руки, а также содержанием воды в тканях. Во время экспозиции влага переходит на эмульсию фотопленки, меняет электрическое поле и вид фотографии».

Исследователи предполагают использовать в дальнейшем эту технику, которую они предпочитают называть «фотографией коронного разряда», для «обнаружения и определения количества влаги как в живых, так и в неодушевленных предметах».

Этот интересный факт, опубликованный в декабрьском номере за 1976 год журнала Scientific American, позволяет сделать два вывода. Во-первых, всякое реальное явление заслуживает внимания, и вполне возможно, что оно окажется практически полезным. И второе: исследователю, открывшему новый факт, нужно прежде всего преодолеть соблазн дать ему трактовку, не укладывающуюся в современные научные представления. Только лишь после того, как будет исчерпывающим образом показано, что существующие теории не в состоянии объяснить новый факт, можно вынести свое открытие на суд специалистов.

Реальным фактам, которым дается ложное объяснение, можно, вспомнив старый анекдот, дать название опытов с тараканами. Анекдот таков: у одного таракана отдирают ноги; калек помещают на стол рядом со здоровым тараканом и стучат по столу. Здоровый бежит, «калека», естественно, не трогается с места. Делается заключение: слух у таракана в ногах.

Каждый год в печати появляются несколько статей, описывающих «опыты с тараканами». Об этом полезно предупредить читателей.

ВЕЩЕСТВО В СОСТОЯНИИ ПЛАЗМЫ

Термин *Plasmenzustand* был еще в 1939 г. впервые предложен двумя немецкими учеными, статью которых пишущий эти строки перевел для журнала «Успехи

физических наук». Название представляется удачным. Действительно, плазма — это не твердое тело, не жидкость и не газ. Это — особое состояние вещества.

Термическая ионизация газов, т. е. отрыв электронов от атомов и разрушение нейтральной молекулы на ионы, начинается при температурах, превосходящих 5—6 тысяч градусов. Стоит ли тогда обсуждать эту проблему? Ведь не существует материалов, которые могли бы выдерживать более высокую температуру.

Без сомнения, стоит. Подавляющее большинство небесных тел, таких как наше Солнце, находятся в состоянии плазмы; примером плазмы может служить ионосфера. С помощью магнитных полей — так называемых магнитных бутылей — можно удерживать плазму в ограниченном объеме и в лабораторных условиях. А кроме того мы можем говорить и о плазме газового разряда.

Степень ионизации газа зависит не только от температуры, но и от давления. Водород при давлении порядка 1 мм ртутного столба практически полностью будет ионизован при температуре 30 тысяч градусов. При этих условиях один нейтральный атом приходится на 20 тысяч заряженных частиц.

Плазменное состояние водорода представляет собой смесь беспорядочно движущихся, сталкивающихся между собой частиц двух газов: «газа» протонов и «газа» электронов. Плазма, образовавшаяся из других веществ, является смесью многих «газов». В ней мы найдем электроны, оголенные ядра, различные ионы, а также незначительное число нейтральных частиц.

Плазму с температурой в десятки и сотни тысяч градусов называют холодной. Горячая плазма — это миллионы градусов.

Но с понятием температуры плазмы надо обращаться осторожно. Как известно читателю, температура однозначно определяется кинетической энергией частиц. В газе, состоящем из тяжелых и легких частиц, состояние равновесия устанавливается лишь тогда, когда легкие и тяжелые частицы приобретают одну и ту же среднюю кинетическую энергию. Это значит, что в газе, живущем долгое время в стабильных условиях, тяжелые частицы движутся медленно, а легкие — быстро. Срок, за который устанавливается равновесие, зависит от

того, что было «в начале». Но при прочих одинаковых условиях равновесие наступит тем позже, чем больше различие в массах частиц.

Именно с таким положением дела мы сталкиваемся в плазме. Ведь массы электрона и самого легкого из ядер отличаются чуть ли не в две тысячи раз. При каждом соударении электрон передает ядру или иону лишь небольшую часть своей энергии. Только после большого числа встреч средние кинетические энергии всех частиц плазмы выравниваются. Такую плазму называют изотермической. Такова, например, плазма, находящаяся в недрах Солнца и звезд. Скорость установления равновесия в горячей плазме лежит в пределах от долей секунды до секунд.

Иначе обстоит дело в плазме газового разряда (искре, дуге и т. д.). В этом случае частицы движутся не только беспорядочно, но и создают электрический ток. Быстро движущийся электрон в своем путешествии между электродами просто не успевает отдать большую часть своей энергии лениво движущимся ионам. Поэтому в газовом разряде средняя скорость движения электронов много выше соответствующей величины для ионов. Такую плазму называют неизотермической, и ее надо характеризовать двумя (а то и тремя, если учитывать нейтральные частицы) температурами. Естественно, электронная температура много выше ионной. Так, в дуговом разряде электронная температура — это 10—100 тысяч градусов, в то время как ионная температура близка к 1000 градусов.

Поведение частиц в плазме можно описывать с помощью тех же величин, которые используются в кинетической теории газов. Разработано много способов, которые прямо или косвенно позволяют определить длину свободного пробега частиц, время свободного пробега, концентрацию частиц разных сортов.

Для того чтобы читатель имел представление о порядках величин, с которыми приходится сталкиваться, приведем некоторые числа, описывающие водородную плазму высокой концентрации (10^{20} ионов на кубический метр). Оказывается, что в холодной плазме (температура — десять тысяч градусов) длина свободного пробега равна 0,03 см, а время свободного пробега $4 \cdot 10^{-10}$ с. Эта же плазма, нагретая до ста миллионов

градусов, характеризуется соответственно числами $3 \cdot 10^6$ см и $4 \cdot 10^{-4}$ с.

Приводя подобные данные, надо обязательно добавлять, о каких столкновениях идет речь. Мы привели значения для встреч электронов с ионами.

Достаточно очевидно, что объем, содержащий много частиц, будет электрически нейтрален. Но нас может заинтересовать поведение электрического поля в какой-либо точке пространства. Оно быстро и сильно меняется, так как около этой точки то проходят ионы, то проносятся электроны. Можно рассчитать быстроту этих изменений, можно рассчитать среднее значение поля. Плазма с огромной точностью удовлетворяет условию нейтральности. Строгость требует, чтобы мы пользовались словом «квазинейтральность», т. е. почти нейтральность. Но что означает это «почти»?

Довольно несложный расчет показывает вот что. Проведем в плазме отрезок длиной в один сантиметр. Подсчитаем концентрацию электронов и ионов в каждой точке этого отрезка. Квазинейтральность означает, что эти концентрации должны быть «почти» равными. А теперь представим себе, что в одном кубическом сантиметре имеется «лишняя» доля электронов, которая не нейтрализуется положительными ионами. Окажется, что при плотности частиц, равной плотности атмосферного воздуха у поверхности Земли, на отрезке, который мы рассматриваем, образуется поле около 1000 В/см, если различие концентраций ионов и электронов будет равно одной миллиардной доле процента! Вот, что означает слово «почти».

Но даже и это ничтожное нарушение равенства зарядов двух знаков будет длиться кратчайшее мгновение. Образовавшееся поле будет выталкивать лишние частицы. Этот автоматизм действует уже для областей, измеряемых тысячными долями сантиметра.

О плазме в магнитных бутылках мы упомянем еще в четвертой книге. Читатель несомненно встречался с упоминанием, а может быть и с описанием установок типа «токамак». Над их усовершенствованием работает большая армия ученых. Дело заключается в том, что возможность создания высокотемпературной плазмы может привести к слиянию легких атомных ядер, которое сопровождается выделением колоссальной энер-

гии. В бомбах этот процесс физики научились осуществлять. А вот удастся ли создать плазму, которая обладала бы достаточно высокой температурой и достаточным временем жизни, для того чтобы пошла цепная реакция такого типа, которая идет в атомных реакторах, — на этот важный вопрос пока что ответа нет.

МЕТАЛЛЫ

Разделение твердых тел на различные классы по величине их электрического сопротивления определяется подвижностью электронов.

Электрический ток представляет собой поток движущихся заряженных частиц. Когда речь идет о потоках ионов или электронов, мы буквально видим электрический ток. При прохождении через жидкости электрический ток также проявляет себя вполне отчетливо, поскольку на электродах происходит отложение вещества. Что же касается твердых тел, то о том, что собой представляет протекающий по ним ток, мы должны судить лишь косвенно.

Имеется ряд фактов, которые позволяют утверждать следующее. В любых твердых телах атомные ядра не перемещаются. Электрический ток создается электронами. Электроны движутся под действием энергии, которая поставляется источником тока. Этот источник создает внутри твердого тела электрическое поле.

Формула, связывающая напряжение и напряженность электрического поля, остается в силе для любых проводников. Поэтому, объединяя формулы, приведенные на стр. 11 и 18, мы можем записать закон Ома для твердого проводника в форме:

$$j = \sigma E$$

($\sigma = 1/\rho$ называется удельной электропроводностью).

Электроны твердого тела можно разделить на связанные и свободные. Связанные электроны принадлежат определенным атомам, свободные электроны образуют своего рода электронный газ. Эти электроны могут перемещаться по твердому телу. При отсутствии электрического напряжения поведение свободных электронов беспорядочно. Чем больше помех движению сво-

бодных электронов, чем чаще они сталкиваются с неподвижными атомами и друг с другом, тем больше электрическое сопротивление тела.

В диэлектриках подавляющее большинство электронов имеет своего хозяина — атом или молекулу. Число свободных электронов ничтожно.

В металлах каждый атом отдает один-два электрона в общее пользование. Этот электронный газ и является переносчиком тока.

Исходя из очень грубой модели, мы можем прикинуть величину электропроводности и проверить эту модель.

Так же, как мы это делали, когда вели рассуждения относительно газа молекул, предположим, что каждому электрону удастся пройти без соударения некоторый путь l . Расстояние между атомами металла равно нескольким ангстремам. Логично допустить, что длина свободного пробега электронов по порядку величины равна $10 \text{ \AA}$, т. е. 10^{-7} см .

Под действием ускоряющей силы eE движение электрона происходит в течение времени l/v , где v — скорость электрона. Используя данные, взятые из исследований термоэлектронной эмиссии, хаотическую скорость электронов можно оценить. Порядок величины этой скорости 10^8 см/с .

Чтобы определить скорость упорядоченного движения электронов, т. е. скорость того движения, которое создает ток, надо помножить ускорение eE/m на время свободного пробега. Этим допускается, что каждое соударение прекращает движение электрона, после чего он начинает набирать скорость вновь. Произведя умножение, мы получим значение скорости электронов, создающих ток:

$$u = \frac{eEl}{mv}.$$

Теперь поставим перед собой задачу вычислить удельное сопротивление металла. Если получим правильный порядок величины, то значит наша модель «работает».

Предоставим читателю сообразить, что плотность тока j может быть записана как произведение числа электронов в единице объема на заряд электрона и на

упорядоченную скорость: $j = nev$. Подставляя в эту формулу значение упорядоченной скорости электронов, получим: $j = \frac{ne^2 l}{mv} E$, т. е. удельная электропроводность равна

$$\sigma = \frac{ne^2 l}{mv}.$$

Если считать, что каждый атом отдает в общее пользование один электрон, то получится, что проводник имеет удельное сопротивление порядка 10^{-5} Ом · м. Очень разумная величина! Она подтверждает как справедливость грубой модели, так и правильность выбора значения параметров нашей «теории». Я ставлю слово «теория» в кавычки лишь по той причине, что она груба и элементарна. Однако этот пример иллюстрирует типичный физический подход к истолкованию явлений.

Согласно теории свободного электронного газа электрическое сопротивление должно уменьшаться с падением температуры. Только не торопитесь связывать это обстоятельство с изменением хаотической скорости движения электронов. Дело не в ней. Эта скорость мало зависит от температуры. Уменьшение сопротивления связано с тем, что размах колебаний атомов становится меньше, а благодаря этому растет длина свободного пробега электронов.

Этот же факт можно передать и такими словами: при увеличении амплитуд колебания атомов электроны в большей степени рассеиваются в разные стороны. Конечно, благодаря этому слагающая скорости в направлении тока должна уменьшиться, т. е. сопротивление должно возрасти.

Увеличением рассеяния электронов объясняют также возрастание сопротивления металла (и не только металла) с добавлением примесей. Действительно, примесные атомы играют роль дефектов кристаллической структуры и следовательно способствуют рассеянию электронов.

Электрическая энергия передается по проводам. Из-за электрического сопротивления провода забирают энергию у источника тока. Потери эти огромны, и борьба с ними представляет собой важнейшую техническую задачу.

Есть надежда, что эта задача может быть решена, ибо существует замечательное явление сверхпроводимости.

Голландским физиком Камерлинг-Оннесом в 1911 г. было обнаружено, что при температурах, близких к абсолютному нулю, некоторые тела скачком теряют практически полностью свое электрическое сопротивление. Если в кольце сверхпроводника возбудить электрический ток, то он будет течь в проводнике сутками, не затухая. Из чистых металлов наиболее высокой температурой, при которой проявляются сверхпроводящие свойства, обладает ниобий (9 К). Не приходится и говорить, сколь настойчиво занят огромный отряд ученых поиском сверхпроводников, которые приобрели бы это замечательное свойство при более высокой температуре. Пока что успехи не очень велики. Найден сплав, который как будто становится сверхпроводящим при температуре около 20 К.

Однако есть основания полагать, что этот предел можно будет повысить (а может быть и довести до комнатных температур). Поиск ведется среди особых полимерных веществ, среди сложных слоистых материалов, в которых диэлектрик чередуется с металлом. Трудно переоценить значимость этой проблемы. Я беру на себя смелость считать ее одной из важнейших проблем современной физики.

Работы по поиску сверхпроводников, приобретающих это свойство при достаточно высоких температурах, приняли большой размах после того, как была построена теория этого явления. Теория подсказала пути поиска нужных материалов.

Характерно, что между открытием явления и его объяснением прошло очень много времени. Теория была создана в 1957 г. Надо отметить, что законы квантовой физики, с помощью которых построена теория сверхпроводимости, были установлены еще в 1926 г. Из этого следует, что объяснение явления было далеко не простым. В этой книжке я могу лишь дать объяснение, так сказать, с середины истории. Оказывается, что по мере замедления колебаний атомной решетки некоторым электронам удастся «спариться». Такая «пара» ведет себя согласованно. Когда происходит рассеяние пары на атомах (а именно это рассеяние и есть, как мы

говорили выше, причина сопротивления), то отскакивание одного из членов пары в сторону компенсируется поведением его «друга». Компенсируется в том смысле, что суммарный импульс пары электронов остается неизменным. Таким образом, рассеяние электронов не исчезает, но перестает влиять на прохождение тока.

Наряду со спаренными электронами в сверхпроводнике существует и обычный электронный газ. Таким образом, одновременно существуют как бы две жидкости — одна обычная, другая сверхпроводящая. Если температура сверхпроводника начинает повышаться от нуля, то тепловое движение будет разрывать все большее число «пар» электронов — доля обычного электронного газа будет расти. Наконец наступит критическая температура, при которой исчезнут последние спаренные электроны.

С помощью модели двух жидкостей, обычной и особенной, мы объяснили во второй книге явление сверхтекучести, наблюдаемое в жидком гелии. Эти два явления находятся в близком родстве: сверхпроводимость — это сверхтекучесть электронной жидкости.

Пара электронов, о которой мы только что сказали, имеет суммарный спин нуль. Частицы, спин которых равен нулю или целому числу, называются бозонами. При известных условиях бозоны могут собираться в больших количествах на одном и том же энергетическом уровне. В этом случае их движение становится идеально согласованным и их перемещению ничто не может помешать. Мы еще вернемся к этому явлению в четвертой книге.

ВЫХОД ЭЛЕКТРОНОВ ИЗ МЕТАЛЛА

Поскольку часть электронов ведет себя наподобие газа быстрых частиц, то естественно ожидать, что электроны способны выбираться за поверхность металла. Для того чтобы электрон покинул металл, ему надо преодолеть силы притяжения положительных ионов. Работа, которую электрону приходится затратить для достижения этой цели, называют работой выхода.

Чем выше температура металла, тем больше кинетическая скорость движения электронов. Если металл

раскалить, то покинуть его удастся заметному числу электронов.

Исследовать явление термоэлектронной эмиссии — так называют выход электронов из металла — можно с помощью простого опыта. В электрическую лампу впаивается дополнительный электрод. Чувствительным прибором можно измерить величину электрического тока, который будет возникать из-за того, что часть «испаряющихся» электронов попадет на электрод (часть, а не все, по той причине, что электроны вылетают из нити лампы под разными углами).

Если мы хотим оценить работу выхода, то следует прибегнуть к «заградительному» напряжению, т. е. подвести к впаиваемому электроду отрицательный полюс аккумулятора. Постепенно повышая напряжение, мы доберемся до такого его значения, при котором электронам уже не удастся достигнуть электрода.

Работа выхода электронов для вольфрама равняется примерно 5 электрон-вольтам. Можно, если требуется, специальными покрытиями снизить эту работу до значения одного электрон-вольта.

Что же это за единица работы — электрон-вольт? Не трудно сообразить по названию, что она равна энергии, которую приобретет электрон, пройдя участок пути, находящийся под напряжением в 1 В. Один электрон-вольт равен $1,6 \cdot 10^{-19}$ Дж. Хотя тепловые скорости электронов довольно значительны, но масса электрона очень мала. Поэтому приведенная высота барьера весьма высока. Теория и опыт показывают, что выход электронов резко зависит от температуры. Увеличение температуры от 500 до 2000 К влечет за собой увеличение эмиссионного тока в тысячи раз.

Выход электронов из металла благодаря тепловому движению является, так сказать, естественным процессом. Но электрон можно и вышибить из металла.

Во-первых, это можно сделать, бомбардируя металл электронами же. Явление носит название вторичной электронной эмиссии. Оно используется для размножения электронов в технических приборах.

Неизмеримо более существенным является вырывание электронов из твердых тел с помощью света. Это явление носит название фотоэффекта.

ТЕРМОЭЛЕКТРИЧЕСКИЕ ЯВЛЕНИЯ

Очень давно (для эволюции человечества это время — одно мгновение, а для развития науки — чуть ли не вечность), более 150 лет тому назад, был обнаружен простой факт. Если составить электрическую цепь из куска медной и куска висмутовой проволоки, спаяв их в двух местах, то по цепи пойдет ток. Пойдет только в том случае, если один спай будет находиться при температуре более высокой, чем другой. Это явление и называется термоэлектрическим.

Что же заставляет двигаться электроны по составному проводнику? Явление оказывается не таким уж простым. Электродвижущая сила возникает благодаря двум обстоятельствам. Первое — это контактное электрическое поле, второе — температурное электрическое поле.

Мы только что говорили, что для выхода электрона за пределы металла требуется работа. Естественно предположить, что эта работа выхода A не одинакова у разных металлов. Раз так, то между двумя спаянными металлами возникнет напряжение, равное

$$\frac{1}{e}(A_1 - A_2).$$

Можно опытным путем удостовериться в наличии контактного напряжения. Но само по себе оно не может явиться причиной электрического тока в замкнутой цепи. Действительно, замкнутая цепь состоит из двух спаев и контактные напряжения будут погашать друг друга. Но почему же разность температуры спаев создает электродвижущую силу? Ответ подсказывает логика. Видимо, контактное напряжение зависит от температуры. Нагрев одного из спаев делает напряжения неравными и ведет к появлению тока. Но нужно принять во внимание и другое явление. Вполне естественно предположить, что между концами проводника имеется электрическое поле, если эти концы находятся при разных температурах. Ведь при более высокой температуре электроны движутся быстрее. Раз так, то начнется диффузия электрических зарядов, которая будет происходить до тех пор, пока не соз-

дастся поле, уравнивающее тенденцию к равномерному распределению.

Опыты не оставляют сомнения в том, что оба явления присутствуют одновременно и оба они должны быть приняты во внимание при создании теории.

Термоэлектродвижущие силы невелики — порядка единиц милливольт при разностях температур в 100 градусов. Но такие напряжения измеряются легко. Поэтому термоэлектродвижущий эффект используют для измерения температур. Ведь в расплав металла стеклянный термометр не сунешь. Вот в таких случаях термопара (так называется термоэлемент, используемый для измерения температуры) и оказывается великолепным инструментом. Впрочем, у термопары еще много достоинств. Сколь существенна возможность измерения температуры на больших расстояниях! А чувствительность! Электрические измерения очень точны, и оказывается, что с помощью термопары можно мерить разности температур в миллионные доли градуса.

Эта высокая чувствительность позволяет применять термоэлементы для измерения тепловых потоков, проходящих со стороны отдаленных объектов. Читатель может прикинуть сам возможности термоэлемента. Достаточно сказать, что десятые доли эрга в секунду не являются для него пределом.

Так же как и аккумуляторы, термоэлементы иногда собирают в батареи. Если нужна не очень большая энергия, то такая батарея может служить генератором энергии, который находит себе применение для радиосвязи.

ПОЛУПРОВОДНИКИ

Многие вещества — и элементы, и химические соединения — заполняют по значениям своей проводимости широчайший интервал между проводниками и изоляторами. О существовании таких тел было известно очень давно. Но каких-нибудь двадцать лет назад вряд ли кто-либо предвидел, что физика полупроводников породит отрасль промышленности, важность которой трудно переоценить. Нет полупровод-

ников — значит нет современных электронно-вычислительных машин, телевизоров и магнитофонов. Без полупроводников немыслима современная радиотехника.

Проводимость изоляторов лежит между 10^{-8} и 10^{-18} Ом $^{-1}$ ·м $^{-1}$, проводимость металлов имеет значения между 10^2 и 10^4 этих же единиц. Удельная проводимость полупроводников лежит между этими двумя интервалами. Однако мы узнаём, что имеем дело с полупроводником, не только по величине его сопротивления.

Так же как и в случае металлов, при протекании тока в полупроводниках мы не наблюдаем каких бы то ни было химических изменений. Значит ионы этих веществ, образующие каркас кристаллической решетки, не перемещаются под действием поля. Следовательно, как и в металлах, мы должны приписать проводимость движению электронов.

Хотя это обстоятельство вроде бы самоочевидно, но на заре изучения полупроводников физики решили на всякий случай проверить, какие заряды являются переносчиками тока. В случае твердых тел эту проверку можно сделать при помощи эффекта Холла.

В следующей главе я напомним вам, что под действием магнитного поля положительные и отрицательные частицы отклоняются, и притом в разные стороны. Если твердое тело, внутри которого движутся заряды, изготовить в виде полоски и поместить в соответствующим образом направленное магнитное поле, то между краями пластинки возникнет напряжение. Схема опыта показана на рис. 2.8.

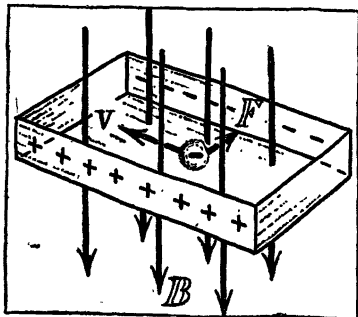


Рис. 2.8.

Каково же было удивление физиков, которые выяснили, что приходится встречаться с телами, которые при исследовании по показанной схеме ведут себя иногда так, как будто бы по проводу движутся положительные частицы, а в других случаях — так, как если бы переносчики электричества

имели отрицательный знак. Дать название этому поведению нетрудно. В первом случае будем говорить о позитивной проводимости (p -тип), во втором — о негативной (n -тип). Но дело не в названии, а в объяснении существа дела. Ведь нет никакого сомнения в том, что внутри полупроводника движутся электроны. Как же выйти из противоречия? Как объяснить позитивную проводимость?

Представьте себе строй физкультурников. Один человек вышел по каким-то причинам из строя. Осталось свободное место. Хотя это звучит не очень эстетично, скажем так: образовалась «дырка». Для того чтобы выравнять строй, дана команда соседу «дырки» передвинуться на соседнее место. Но тогда, как совершенно ясно, образуется новое пустое место. И его можно заполнить, приказав следующему человеку занять место «дырки». Если физкультурники будут перемещаться справа налево, то «дырка» будет перемещаться слева направо. Вот эта схема и объясняет позитивную проводимость полупроводников.

Концентрация свободных электронов в полупроводниках очень мала. Поэтому уже само значение проводимости (вспомните формулу, которую мы недавно вывели для плотности тока) подсказывает нам, что большинство атомов полупроводника является не ионами, а нейтральными атомами. Но полупроводник все же не изолятор. Значит небольшое число электронов выпущено на свободу. Эти электроны будут двигаться, как в металле, и создадут негативную, т. е. электронную, проводимость. Но положительный ион, окруженный нейтральными атомами, находится в неустойчивом состоянии. Как только на твердое тело накладывается электрическое поле, положительный ион постарается «переманить» электрон от своего соседа; так же точно поступит и соседний атом. Положительный ион вполне аналогичен «дырке». Перехватывание электронов может пересилить движение свободных электронов. Так возникает позитивная, или дырочная, проводимость.

Но может быть вам не нравится эта модель? Могу предложить другую. Как мы сказали, энергия частиц квантуется. Таков основной закон природы. Все явления, происходящие в полупроводниках, превосходно

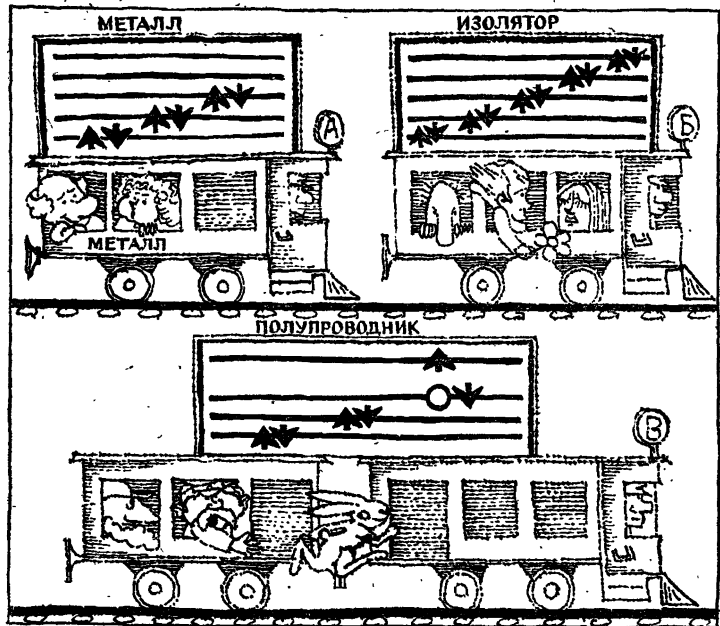


Рис. 2.9.

объясняются, если допустить, что, как и в атоме, электроны распределены по энергетическим уровням и в твердом теле. Но так как электронов в твердом теле очень много, то теперь уровни как бы сливаются в энергетические полосы (другое название — энергетические зоны).

Если взаимодействие электронов друг с другом слабое, то ширина зоны будет очень узкой. Поэтому на внутренние электроны практически не влияет то, что атомы, которым они принадлежат, входят в состав твердого тела.

А вот с внешними электронами дело обстоит иначе. Их уровни и образуют зоны. У разных тел ширина этих зон и «расстояния» между ними различны (надо говорить — энергетические промежутки; «расстояния» в этом контексте — это физический жаргон).

Эта картина превосходно объясняет деление твердых тел по электропроводности на металлы, полупро-

водники и изоляторы (рис. 2.9). Когда зона полностью заполнена электронами и расстояние до верхней пустой зоны велико, то тело является изолятором. Если верхняя зона заполнена электронами частично, то такое тело — металл, ибо любое сколь угодно малое электрическое поле может перевести электрон на чуть более высокий энергетический уровень. Полупроводник характерен тем, что его верхняя зона отделена от ближайшей нижней небольшим промежутком. В отличие от изоляторов и металлов, в случае полупроводников тепловое движение способно переводить электроны с одной зоны в другую. В отсутствие поля число таких переходов вверх и вниз одинаково. Повышение температуры приводит лишь к тому, что концентрация электронов в верхней зоне растет.

Но что будет, когда на полупроводник будет наложено поле?

Теперь свободный электрон, находящийся в верхней зоне, начнет двигаться и даст вклад в негативную проводимость. Но равновесие переходов вниз и вверх будет нарушено. Поэтому в нижней зоне образуется «дырка», которая будет под действием поля двигаться в противоположную сторону. Такие полупроводники называют проводниками со смешанной (позитивно-негативной) проводимостью.

Зонная теория полупроводников является стройной теорией. Читатель не должен полагать, что описанная модель является искусственной и надуманной. Она просто и отчетливо объясняет основное отличие металла и полупроводника, а именно, их особое поведение с изменением температуры. Как говорилось в предыдущем параграфе, с возрастанием температуры электрическая проводимость металлов падает — электроны чаще сталкиваются с препятствиями. В полупроводниках возрастание температуры влечет за собой увеличение числа электронов и дырок, а значит увеличение проводимости. Этот эффект, как показывают расчеты, существенно превосходит уменьшение проводимости из-за столкновений с препятствиями.

Для техники основное значение имеют проводники с примесями. В этом случае удастся создать тела, обладающие только позитивной или только негативной проводимостью. Идея крайне проста.

Наиболее распространенными полупроводниками являются германий и кремний. Эти элементы четырехвалентны. Каждый атом связан с четырьмя соседями. Идеально чистый германий будет полупроводником смешанного типа. Число дырок и электронов на 1 см^3 очень мало, а именно равно $2,5 \cdot 10^{13}$. Это значит примерно один свободный электрон и одна дырка на миллиард атомов.

Заместим теперь один из атомов германия на атом мышьяка. Мышьяк пятивалентен. Четыре его электрона пойдут на то, чтобы связаться с атомами хозяина — германия, а пятый будет свободным. Материал будет обладать электронной (негативной) проводимостью, ибо появление атома мышьяка, разумеется, не приведет к образованию дырок.

Если примесь мышьяка совершенно ничтожна — один атом на миллион, то проводимость германия возрастает уже в тысячу раз.

Вполне понятно, что требуется для превращения германия в проводник *p*-типа. Для этого надо заместить атом германия на трехвалентный атом, — скажем, атом индия.

Теперь ситуация будет следующая. Атом германия, находящийся по соседству с гостем, превратится в положительный ион, так как ему придется волею-неволею образовать связь с атомом индия, которому не хватает электрона. Но мы уже знаем, что положительный ион играет роль дырки. Под действием поля «дырка» будет перемещаться, а движения свободных электронов не будет.

Не приходится удивляться, что промышленность полупроводников оказала огромное влияние на технику выращивания чистых кристаллов. Как же иначе, раз миллионные доли примесей решают дело!

Было бы неверным представлять себе, что в проводниках *n*-типа отсутствует дырочная проводимость. Дырки имеются, но их число существенно меньше числа свободных электронов. Электроны в случае полупроводников *n*-типа являются основными носителями тока, а дырки, представленные в меньшинстве, называют неосновными носителями тока. Напротив, в проводниках *p*-типа основными носителями являются дырки, а неосновными — электроны.

p — n -ПЕРЕХОД

После того как стало понятным, что такое p - и n -полупроводники, можно разобраться в одном интересном эффекте, очень важном для современной электроники. Эффект возникает в области перехода между p - и n -полупроводниками, плотно соединенными друг с другом (p — n -переход). Английское слово *transition*, переход, послужило основой для названия целого класса приборов, работа которых основана на p — n -переходе. Что же произойдет, если взять два бруска одинакового сечения с очень-очень гладко отшлифованными торцами, один из которых будет изготовлен из Ge с примесью In (полупроводника p -типа), а другой из Ge с примесью As, потом сложить их торцами и плотно прижать друг к другу. Получится, фактически, единый кристалл германия, только в одной половине будет избыток свободных электронов, а в другой — избыток дырок.

Чтобы не усложнять объяснения, забудём про неосновные носители тока. В начальный момент времени (см. рис. 2.10, вверху) обе половины кристалла электрически нейтральны. Но в n -части имеется (несмотря на электрическую нейтральность) «лишнее» число электронов (черные точки), а в правой p -части бисквита — «лишние» дырки (кружки).

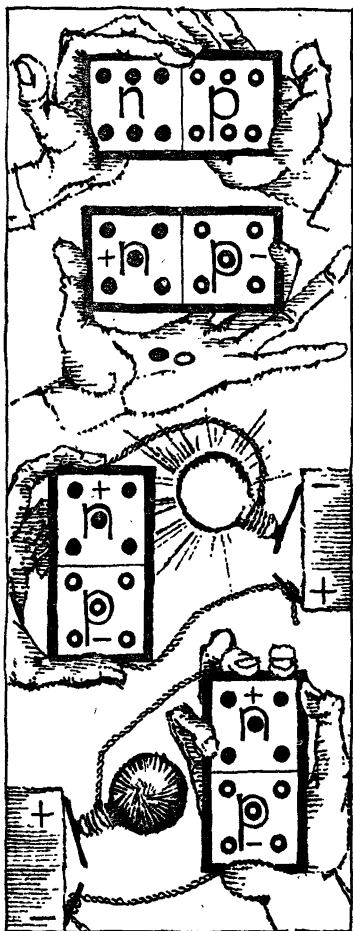


Рис. 2.10.

И электроны, и дырки могут свободно переходить через границу. Причина перехода совершенно та же, что и в случае перемешивания двух газов, сосуды с которыми соединены. Но, в отличие от газовых молекул, электроны и дырки обладают способностью к рекомбинации.

Было у нас шесть черных точек слева и шесть кружков справа. Как только начался переход, кружок и точка уничтожили друг друга. На следующей схеме показано, что в левой части осталось меньше электронов, чем это нужно, чтобы эта половинка бисквита была электрически нейтральной; правая часть имеет одним кружком меньше.

Отняв электрон у левой половины, мы зарядили ее положительно, по той же причине правая часть приобрела отрицательный заряд.

Переход через границу следующих дырок и электронов уже затруднен. Им приходится двигаться против образовавшегося электрического поля. Переход будет продолжаться какое-то время, до тех пор, пока тепловое движение будет способно преодолеть все возрастающий энергетический барьер, а затем наступит динамическое равновесие.

Что произойдет, если к p — n -бисквиту подвести напряжение, и при этом так, как показано на третьей сверху схеме? Очевидно, в этом случае мы сообщаем носителям тока дополнительную энергию, позволяющую им перемахнуть через барьер.

Напротив, если к n -части подвести положительный полюс, то переход дырок и электронов через барьер продолжает быть невозможным.

Итак, p — n -переход обладает выпрямляющими свойствами.

В настоящее время в самых разных областях техники используются выпрямители (вентили, диоды — это по сути дела синонимы), принцип действия которых мы объяснили.

Наша схема крайне груба. В ней не рассмотрено в каких-либо деталях поведение дырок и электронов, которые способны проскакивать через границу без рекомбинации, а главное оставлен без внимания ток неосновных носителей, который приводит к тому, что выпрямление тока p — n -бисквитом не полное. На

самом деле слабый ток при наложении напряжения по самой нижней схеме все же имеет место.

Опишем теперь несколько детальнее события, которые происходят на границе тогда, когда устанавливается динамическое равновесие.

Откинем простое допущение, которое мы приняли выше, то есть вспомним про существование неосновных носителей.

Картина установления динамического равновесия будет такая. Из глубины p -кристалла все ближе к границе начинает возрастать дырочный ток. Вклад в него дают те дырки, которые успеют дойти до p — n -перехода и проскочить его, не рекомбинируя с электронами.

Конечно, эти дырки должны иметь кроме того достаточную энергию, чтобы перескочить потенциальный барьер.

Пройдя переходную область, этот ток начинает постепенно затухать из-за рекомбинации с электронами. В то же время в n -части из глубины возрастает дырочный ток в противоположном направлении. Дырок в этой области гораздо меньше, но зато им не надо преодолевать барьер для того, чтобы попасть в p -область. Можно сказать, что барьер подстраивается таким образом, чтобы прямой и обратный токи компенсировали друг друга.

Все сказанное относится и к электронному току. Правда, величины дырочного и электронного токов могут сильно различаться из-за того, что p - и n -области по-разному обогащены примесями и, следовательно, свободными носителями. Если, например, в p -области дырок гораздо больше, чем электронов в n -области, то дырочный ток будет гораздо больше электронного. В этом случае p -область называют эмиттером (излучателем) свободных носителей тока, а n -область — базой.

При таком более детальном описании событий, которые происходят на p — n -границе, мы поймем, что выравнивание тока не может быть полным.

Действительно, если положительный полюс подвести к p -кристаллу, то барьер понизится. Напряжение подгоняет электроны. Если положительный полюс подведен к n -части, то электрическое поле, созданное источником питания, совпадает по направлению с полем барьера. Поле в переходе увеличится. Теперь ко-

личество электронов, способных преодолеть барьер, так же как и число дырок, способных перейти в обратную сторону, уменьшится. Отсюда и увеличение сопротивления в области перехода, которое ведет к так называемой несимметричной вольт-амперной характеристике.

Итак, более глубокое рассмотрение отчетливо поясняет, по какой причине выпрямление, происходящее в переходном слое, не будет полным.

МЕРА МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Взаимодействие стерженьков и стрелок, изготовленных из некоторых железных руд, было известно весьма давно. Эти предметы отличались особым свойством: один из концов стрелки указывал на север. Так что стрелке можно было приписать два полюса: северный и южный. Легко доказывалось, что одноименные полюса отталкиваются, а разноименные притягиваются.

Тщательное исследование поведения этих особых тел, получивших название магнитов, было произведено Уильямом Гильбертом (1540—1603). Были выяснены как закономерности их поведения в разных точках земного шара, так и правила взаимодействия между собой.

21 июля 1820 г. датский физик Эрстед выпустил в свет и широко разрекламировал свою работу, носившую весьма странное название: «Опыты, касающиеся действия электрического конфликта на магнитную стрелку». Небольшая — всего лишь четыре страницы — статья сообщала читателю, что Эрстед (а если быть точным, то какой-то слушатель лекций Эрстеда) заметил, что магнитная стрелка отклоняется, если ее поместить вблизи провода, по которому идет ток.

Сразу вслед за этим открытием последовало и другое. Замечательный французский физик Андре Мари Ампер (1775—1836) обнаружил, что электрические токи взаимодействуют друг с другом.

Итак, магниты действуют на другие магниты и токи, а токи — на другие токи и магниты.

Для описания этих взаимодействий, так же как и электрических, удобно ввести понятие поля. Скажем, что электрические токи, природные и искусственные магниты создают магнитные поля.

Стоит подчеркнуть, что реальность существования электрического и магнитного полей, иными словами, то обстоятельство, что поле является видом материи, доказывается лишь исследованиями переменных полей. Пока что поле для нас — удобное понятие, не более того. Действительно, источники магнитного поля могут быть спрятаны за ширмой, а мы можем судить о его наличии в пространстве по действиям, которое оно производит.

На наличие магнитного поля реагируют те же системы, которые его создают, т. е. магнитное поле действует на магнитные стрелки и электрические токи. Первой задачей, которая встает перед исследователем, изучающим магнетизм, является «прощупывание» пространства, в котором существует магнитное поле. Характеризуя электрическое поле, мы определяли в каждой точке поля величину силы, действующей на единичный заряд. А как надо поступить для того, чтобы описать магнитное поле?

Маленькая магнитная стрелка в общем случае ведет себя достаточно сложно. Она повернется определенным образом, но иногда будет и двигаться поступательно. Для того чтобы охарактеризовать магнитное поле, не надо давать стрелке возможность перемещаться. Прежде всего следует выяснить, в каком направлении смотрит ее северный полюс (т. е. тот конец, который в отсутствие токов и магнитных предметов смотрит в сторону Севера).

Мы пояснили выше, что удобным графическим приемом описания силовых линий электрического поля является введение в обиход силовых линий. Направление электрических силовых линий указывало, куда отклоняется положительный заряд. Густота соответствовала величине силы. Аналогичным образом можно поступить и при описании магнитного поля. Конец свободно поворачивающейся магнитной стрелки укажет направление силовых линий.

Ну, а что же принять за меру «интенсивности» магнитного поля? Можно, конечно, измерять с помощью

простого устройства момент силы, действующий на магнитную стрелку. Но, пожалуй, стоит поискать другой способ. Ведь магнитная стрелка — своего рода «вещь в себе». Проводя опыты с магнитной стрелкой, мы должны одновременно искать меру «интенсивности» магнитного поля и меру, характеризующую стрелку. Такой ситуации физики предпочитают избегать. Лучше погнаться сначала за одним зайцем, а потом за другим.

Итак, сохраним пока что за магнитной стрелкой функцию определения рисунка силовых линий. А для введения количественной меры «интенсивности» магнитного поля обратимся к одному из опытов Ампера, который еще в 1820 г. обнаружил, что контур тока ведет себя очень похоже на магнитную стрелку. А именно, контур тока поворачивается в магнитном поле, причем нормаль к его плоскости смотрит туда же, куда и магнитная стрелка, т. е. вдоль силовых линий. Роль северного полюса играет та сторона контура тока, смотря на которую мы видим ток идущим против часовой стрелки.

В отличие от магнитной стрелки, контур тока не является объектом, который непонятно как характеризовать. Свойства контура тока однозначно определяются силой тока, площадью и направлением нормали к площади. Надо думать, что такой контур явится неплохим прибором для прощупывания магнитного поля.

Итак, мы решаем принять за меру «интенсивности» магнитного поля вращательный момент, действующий на контур тока. Не следует думать, что такой прибор менее удобен, чем магнитная стрелка. Хороший экспериментатор может изготовить контур крошечной площади, придумает простой метод уравнивания поворота, который совершает поле, сжатием калиброванной пружины.

Прежде всего нам нужно выяснить поведение разных пробных контуров в какой-то определенной точке неизменного магнитного поля.

Результат этого исследования таков: момент силы пропорционален произведению силы тока на площадь. Значит пробный контур характеризуется не силой тока и площадью самими по себе, а их произведением.

Кроме этого произведения нам надо знать, как расположена нормаль контура по отношению к направ-

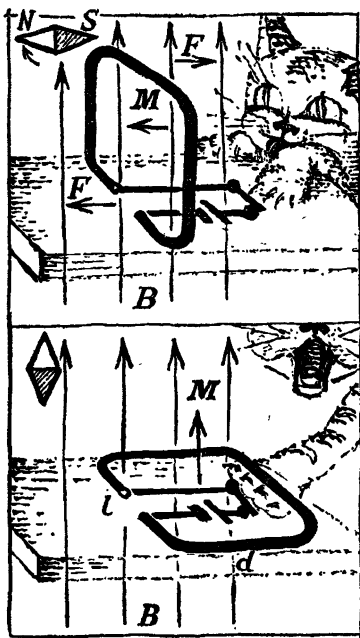


Рис. 3.1.

лению поля. Ведь контур ведет себя наподобие магнитной стрелки. Поэтому, если установить контур так, чтобы его положительная нормаль (т. е. вектор, выходящий с северной стороны) смотрела вдоль силовых линий, то он в этом положении и останется (момент силы равен нулю) (рис. 3.1, внизу). Если расположить его так, чтобы нормаль была перпендикулярна к силовым линиям, то момент силы будет максимальным (рис. 3.1, вверху).

Из всего сказанного следует целесообразность введения нового понятия. Понятия, как мы поймем ниже, очень важного. Мы будем характеризовать контур тока вектором M ,

который назовем магнитным моментом (см. рис. 3.1). Величина магнитного момента принимается равной произведению силы тока I на площадь контура $S = l \cdot d$:

$$M = IS.$$

Вектору S придается направление положительной нормали к плоскости контура.

Итак, мы обладаем прибором, с помощью которого можно измерять поле. Удобнее всего измерять максимальный момент силы, действующий на пробный контур.

Переходя от одной точки поля к другой или меняя поле за счет перемещения его источников или изменения силы токов, создающих поле, мы будем получать все время различные значения момента пары сил F , действующих на пробный контур. Максимальное значение момента силы можно записать так:

$$N = BM,$$

где B — величина, которую мы и примем за меру поля. Она называется магнитной индукцией. Итак, магнитная индукция равна максимальному моменту силы, действующему на пробный контур с единичным магнитным моментом.

Густоту силовых линий, т. е. их число, приходящееся на единицу площади, мы и примем пропорциональной величине B . Вектор B направлен вдоль силовых линий.

Магнитный момент, магнитная индукция и наш старый знакомый момент силы являются векторами. Но немного призадумавшись, мы должны будем согласиться с тем, что эти вектора отличаются от векторов смещения, скорости, ускорения, силы... Действительно, вектор, скажем, скорости движения тела указывает, в какую сторону тело движется; вектора ускорения и силы показывают, в каком направлении действует притяжение или отталкивание. Стрелочка, которой мы заканчиваем отрезок, символизирующий вектор, имеет в этих примерах вполне объективный и реальный смысл. Что же касается наших новых знакомцев и момента силы, то здесь дело обстоит иначе. Вектора направлены вдоль оси вращения. Ясно, что стрелка, поставленная на том или ином конце отрезка, характеризующего ось вращения, носит совершенно условный характер. Однако условиться о направлении вектора необходимо. Стрелка на «конце» оси вращения смысла не имеет. Но объективный смысл имеет направление вращения. Его-то нам и надо характеризовать. Условливаются снабжать ось вращения стрелкой так, чтобы, смотря против вектора, видеть вращение либо по, либо против часовой стрелки. Физики привыкли ко второму варианту.

Эти два типа векторов носят выразительные и говорящие сами за себя названия: полярные и аксиальные («аксе» в переводе значит ось) вектора.

Измерения полей различных систем приводят нас к следующим правилам. В магнитах мы всегда обнаруживаем два полюса: северный, из которого силовые линии выходят, и южный, на котором они заканчиваются. Что происходит с силовыми линиями внутри магнита, мы, естественно, не можем определить опытом.

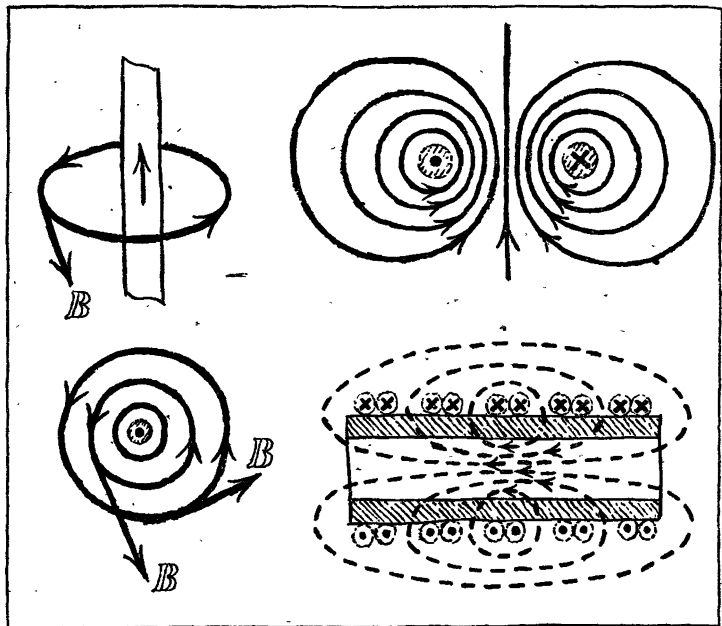


Рис. 3.2.

Что же касается магнитных полей токов (рис. 3.2), то здесь обнаруживается такая закономерность: магнитные силовые линии оборачиваются около тока. При этом если смотреть вдоль тока, то силовые линии будут иметь направление, в котором движется часовая стрелка. Точка и крестик на рисунках обозначают (это общепринято), что ток идет к нам и от нас.

Магнитный момент, как это очевидно из формулы, измеряется в амперах, умноженных на квадратный метр.

Единицей магнитной индукции является тесла. Один тесла равен $1 \text{ кг}/(\text{A} \cdot \text{с}^2)$.

Магнитные поля создаются токами и постоянными магнитами. Магнитные поля действуют на токи и постоянные магниты. Если почему либо исследователь не хочет прибегать к понятию магнитного поля, то он может разбить все виды взаимодействий, в которых принимают участие магнитные поля, на четыре группы: магнитные, т. е. действия магнита на магнит; электро-

магнитные, т. е. действия токов на магнит; магнитоэлектрические, т. е. действия магнита на ток; и, наконец, электродинамические, т. е. действия тока на ток.

В основном этой терминологией пользуются техники. Скажем, они называют прибор магнитоэлектрическим тогда, когда магнит закреплен, а рамка с током подвижная.

Электродинамические взаимодействия положены в основу современного определения единицы силы тока. Вот как звучит это определение: ампер есть сила неизменяющегося тока, который, проходя по двум параллельным прямолинейным проводникам бесконечной длины и ничтожно малого кругового сечения, расположенным на расстоянии 1 м один от другого в вакууме, вызвал бы между этими проводниками силу, равную $2 \cdot 10^{-7}$ ньютона на один метр длины.

В принятой теперь всем миром системе СИ единица силы тока является основной. Соответственно кулон определяется как ампер-секунда. Должен признаться читателю, что мне больше нравится такая система единиц, в которой единица количества электричества является основной и выраженной через массу осаждаемого при электролизе серебра. Но метрологам виднее. Видимо, у приведенного выше определения есть какие-то достоинства, хотя, мне кажется, практическое измерение электродинамической силы с большой точностью — далеко не простая задача.

Зная, как определять направление магнитного поля, а также правила нахождения направления силы, действующей на ток со стороны магнитного поля (о чем чуть ниже), читатель сумеет сам выяснить, что параллельно текущие токи притягиваются, противоположно направленные отталкиваются.

ДЕЙСТВИЯ ОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Однородным является такое магнитное поле, действие которого на любые индикаторы поля одинаково в разных местах.

Такое поле удастся создать между полюсами магнита. Естественно, чем ближе друг к другу располо-

жены полюса и чем больше плоская поверхность торцов магнита, тем поле однороднее.

О действии однородного магнитного поля на магнитную стрелку и контур тока уже сказано: если нет уравнивающей пружины, то они установятся в поле так, чтобы их магнитный момент совпадал с направлением поля. «Северный полюс» будет смотреть на «южный полюс» магнита. Этот же факт можно выразить словами: магнитный момент установится вдоль силовых линий магнитного поля.

Рассмотрим теперь действие магнитного поля на движущиеся заряды.

В том, что действие имеется, и притом весьма немалое, убедиться донельзя просто: достаточно поднести самый обычный школьный магнит к электронному лучу, созданному электронной пушкой. Светящееся пятно на экране сместится и будет менять место на экране в зависимости от положения магнита.

От качественной демонстрации явления можно перейти к количественному исследованию, и тогда окажется, что величина силы, действующей со стороны магнитного поля B на электрон, движущийся в поле со скоростью v под прямым углом к силовым линиям, равна

$$F = evB,$$

где e — заряд частицы (закон, конечно, справедлив не только для электронов, но и для любых заряженных частиц).

А вот если частица движется вдоль силовой линии магнитного поля, то поле на нее не действует! Читателю, знающему тригонометрию, нетрудно сообразить, как написать выражение силы для случая движения под некоторым углом к полю. Мы не станем загромождать текст формулами, которые нам не понадобятся в дальнейшем.

Но еще ничего не сказано о направлении силы. А это крайне важно. Опыт показывает, что сила перпендикулярна как направлению движения частицы, так и направлению индукции. Или иначе: перпендикулярна плоскости, проходящей через вектора v и B . Но этим ведь еще не все сказано. У каждой медали две стороны. В чем они отличны? В направлении поворота,

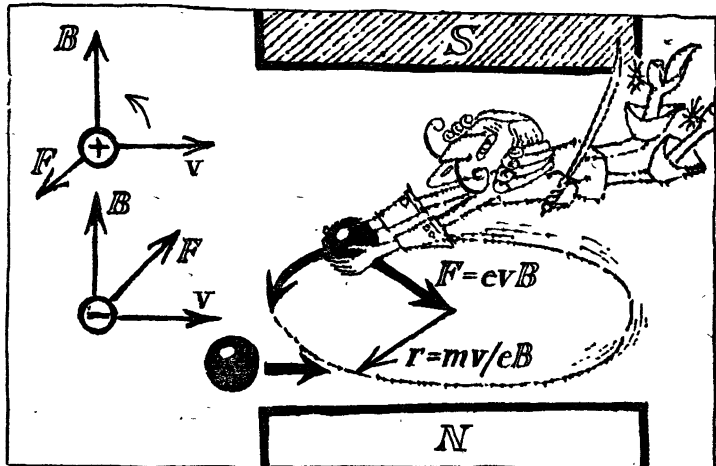


Рис. 3.3.

совмещающего один вектор с другим. Если поворот вектора v к вектору B на угол, меньший 180° , мы видим происходящим против часовой стрелки, то эту сторону называют положительной.

Простые векторные схемы, изображенные слева на рис. 3.3, показывают, что положительно заряженная частица отклоняется в сторону положительной нормали. Электрон отклоняется в обратную сторону.

Теперь поглядите, к какому интересному результату приводит этот закон для электрона, влетевшего в постоянное магнитное поле под прямым углом (рис. 3.3 справа). Сообразите: какую траекторию будет описывать электрон? Ну, конечно, он будет двигаться по окружности. Сила магнитного поля является центростремительной силой, и мы сразу же вычислим радиус окружности, приравнявая mv^2/r и evB . Итак, радиус траектории равен

$$r = mv/eB.$$

Обратите внимание на то, что по поведению частицы вы можете вычислить ее свойства. Но опять та же история, с которой мы столкнулись, изучая движения частицы в электрическом поле. Не удастся определить отдельно электрический заряд и отдельно массу частицы!

Опыт приводит нас и в этом случае к величине отношения e/m .

Итак, частица движется по окружности, если ее скорость направлена под прямым углом к магнитному полю; частица движется по инерции, если ее скорость направлена вдоль магнитного поля. Ну, а в общем случае? Ваш ответ, конечно, уже готов. Частица движется по спирали, осью которой является силовая линия. Спираль будет состоять из тесно или редко навитых витков, в зависимости от начального угла влета электрона в магнитное поле.

Раз магнитное поле действует на движущуюся частицу, то оно должно оказывать силу и на каждый кусочек провода, по которому течет ток. Рассмотрим «отрезок» электронного луча длиной l . Пусть на этом отрезке уместится n частиц. Сила, действующая на провод такой же длины, по которому движется столько же частиц с такой же скоростью, будет равна $nevB$. Сила тока равняется полному заряду, проходящему через провод в единицу времени. Время τ , за которое рассматриваемые электроны пробегут путь l , равно

$$\tau = l/v.$$

То есть силу тока можно записать так

$$I = \frac{ne}{\tau} = \frac{nev}{l}.$$

Подставляя скорость

$$v = Il/ne$$

из этого выражения в формулу для силы, действующей на «отрезок» электронного луча, мы и найдем силу, которая действует на проводник длиной l . Вот это выражение:

$$F = IlB.$$

Оно справедливо только для случая, когда провод перпендикулярен полю.

Направление отклонения провода, по которому протекает ток, можно определить с помощью схемы, показанной на рис. 3.3.

Из уважения к исследователям, работавшим в девятнадцатом веке, я привожу рис. 3.4. Впрочем, рису-

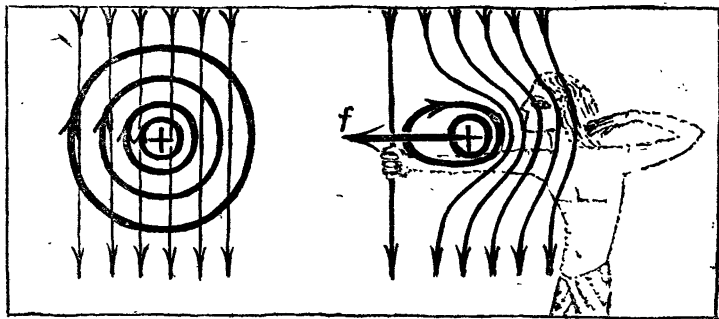


Рис. 3.4.

нок представляет не только академический интерес. Он помогает запомнить правило отклонения токов. Рисунок показывает, как сложится собственное поле тока (идущего «от нас») с внешним полем. Результат сложения показан справа. Если представлять себе силовые линии как натяжения эфирной материи (а такая точка зрения была широко распространена в прошлом веке), то направление смещения проводника получает наглядную интерпретацию: проводник просто выталкивается полем.

Покажем теперь, что действие магнитного поля на движущийся заряд и на отрезок тока — это то же самое явление, с которого мы начали рассмотрение действий магнитного поля.

Вернемся к рис. 3.1. На рисунке показаны силы, действующие на контур тока. На участки провода, идущие вдоль силовых линий, силы не действуют; на другие два участка действует пара сил, и из рисунка ясно, что момент этой пары как раз и равен произведению силы на плечо:

$$N = IlBd = ISB = MB.$$

Таким образом, выражение для момента силы как произведения магнитного момента контура на величину магнитной индукции прямо вытекает из формулы силы, действующей на заряд.

Кстати говоря, формула $F = evB$, с которой мы начали этот параграф, носит имя Лоренца (Гендрик Антон Лоренц, 1853—1928, голландский физик, предложил эту формулу в 1895 г.).

ДЕЙСТВИЯ НЕОДНОРОДНОГО МАГНИТНОГО ПОЛЯ

Создать неоднородное магнитное поле совсем не трудно. Скажем, можно полюсам магнита придать изогнутую форму (рис. 3.5). Тогда ход силовых линий будет таким, как показано на рисунке.

Положим, что полюса достаточно отдалены друг от друга, и поместим магнитную стрелку вблизи одного из полюсов. Как мы бегло упомянули, в общем случае магнитная стрелка не только поворачивается, но и движется поступательно. Одно лишь вращательное движение магнитной стрелки (или контура тока) наблюдается в том случае, если поле однородно. А вот в неоднородном поле будут иметь место оба движения. Стрелка повернется так, чтобы установиться вдоль силовых линий, а далее она начнет притягиваться к полюсу (см. рис. 3.5). Стрелка втягивается в ту область, где поле сильнее. (Конечно, художник перестарался — вряд ли даже сильное поле разломает компас.)

В чем причина такого поведения? Очевидно, она заключается в том, что в неоднородном поле на стрелку действует не одна лишь пара сил. «Силы», действующие на северный и южный полюса стрелки, помещенной в неоднородном поле, не одинаковы. Тот ее ко-

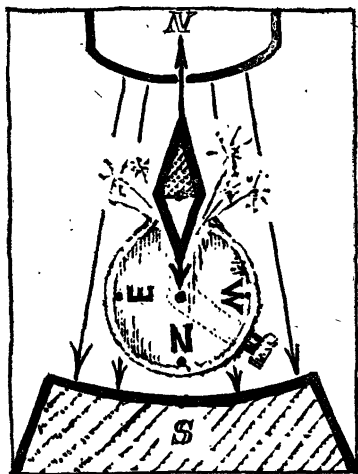


Рис. 3.5.

нец, который находится в более сильном поле, подвергается действию большей силы. Поэтому после поворота картина сил выглядит так, как показано на рисунке: в излишке остается сила, действующая в сторону более сильного поля.

Правда, контур тока мизерной толщины будет вести себя точно таким же образом. Так что, начав с модели стрелки с двумя «полюсами», я лишь пошел навстречу стремлению к наглядности.

Так каков же закон природы? Чему равняется сила? Опыт и вычисления показывают, что для любой системы, обладающей магнитным моментом M , эта сила равняется произведению момента системы на крутизну увеличения поля.

Пусть магнитная стрелка установилась вдоль силовой линии. Значения поля в местах, где находятся северный и южный полюса магнитной стрелки, отличны друг от друга. Построим график поля вдоль линии, проходящей через полюса. Для простоты заменим отрезок истинной кривой поля между полюсами на прямую линию, а это можно сделать с тем большей точностью, чем меньше стрелочка, т. е. чем ближе расположены друг к другу ее полюса. Крутизна, т. е. тангенс угла, образуемого этой прямой на графике с горизонтальной осью, выразится как частное от деления разности полей на длину стрелки. Формула будет иметь вид:

$$F = M(B_N - B_S)/l,$$

где l — длина стрелки, а B_N и B_S — значения поля на северном и южном концах стрелки. (Не удивляйтесь, что тангенс угла оказался размерной величиной.)

Если вместо записанной дроби подставить значение тангенса угла касательной к кривой, изображающей ход поля, в той точке, где находится интересующая нас частица, то «полюса пропадут» и формула будет годиться для любой частицы или системы частиц.

Итак, в неоднородном поле система или частица, обладающие магнитным моментом, притягиваются к полюсам магнита или отталкиваются от них в зависимости от того, как направлен магнитный момент: вдоль или против силовых линий.

А разве может магнитный момент установиться против направления поля? Может! А в каких случаях — об этом речь ниже.

АМПЕРОВЫ ТОКИ

Вплоть до девятнадцатого века создавать физические теории было нетрудным делом. Тело нагрелось — значит в нем содержится больше теплорода. Лекарство позволяет скорее заснуть — значит в нем заключена

снѣтворная сила. Некоторые стерженьки, изготовленные из железных руд, указывают на север. Поведение странное, но мы его сразу же поймем, если скажем, что такие стерженьки и стрелки обладают магнитной душой. Как известно, магнитные стрелки издавна неплохо служили мореплавателям. Однако иногда они баловались. Что же, дело ясное: в этом виноваты злые духи! Столь же не удивительно, что оказалось возможным намагнитить железо, сталь и некоторые другие сплавы. Просто это такие тела, которых легко наградить магнитной душой.

После открытия Эрстеда и Ампера стало очевидным, что между электрическими и магнитными явлениями можно перекинуть мост. Одно время две теории имели одинаково широкое хождение. С одной точки зрения все становилось понятным, если принять, что провод, по которому течет электрический флюид, превращается в магнит. Другая точка зрения принадлежала Амперу. Он утверждал, что магнитная душа железных руд состоит из микроскопических электрических токов.

Точка зрения Ампера казалась многим более логичной. Однако какого-либо серьезного значения этой теории не придавали, поскольку в первой половине девятнадцатого века никто не помышлял не только о возможности реально обнаружить эти токи, но сомневались и в том, что мир построен из молекул и атомов.

И только тогда, когда в двадцатом веке физики доказали серией блестящих опытов, что окружающий нас мир действительно построен из атомов, а атомы состоят из электронов и атомных ядер, в амперовы токи поверили как в реальный факт, с помощью которого можно пытаться понять магнитные свойства вещества. Большинство ученых согласилось, что придуманные Ампером «молекулярные токи» образуются движением электронов около атомных ядер.

Казалось, что с помощью этих представлений удастся объяснить магнитные явления. Действительно, движущийся вокруг ядра электрон можно уподобить электрическому току, мы имеем право приписать этой системе магнитный момент и связать его с моментом импульса движущейся заряженной частицы.

Последнее утверждение доказывается донельзя просто.

Положим, что электрон вращается по окружности радиуса r . Так как сила тока равняется заряду, переносимому в единицу времени, то вращающийся электрон можно уподобить току, сила которого есть $I = Ne$, где N — число оборотов в секунду. Скорость частицы можно связать с числом оборотов соотношением $v = N \cdot 2\pi r$, значит сила тока равна

$$I = \frac{ve}{2\pi r}.$$

Магнитный момент электрона, движущегося вокруг ядра, естественно назвать орбитальным. Он будет равняться:

$$M = IS = \frac{ve}{2\pi r} \pi r^2 = \frac{1}{2} e v r.$$

Напомним читателю (см. первую книгу), что момент импульса частицы равен $L = mvr$, мы выясним, что между моментом импульса и магнитным моментом имеет место следующее очень важное для атомной физики соотношение:

$$M = \frac{e}{2m} L.$$

Отсюда следует, что атомы должны обладать магнитными моментами.

Различными приемами, на которых мы не станем останавливаться, можно получить атомный газ самых различных веществ. С помощью двух щелей в газовой камере создаются пучки нейтральных атомов водорода, лития, бериллия... Их можно пропускать через неоднородное магнитное поле, и на экране будут видны следы пучка. Вопрос, который мы ставим природе, состоит в следующем: будут ли отклоняться потоки атомов от прямого пути, и если будут, то как?

Атом обладает орбитальным моментом, а значит ведет себя наподобие магнитной стрелочки. Если магнитный момент направлен вдоль поля, то атом должен отклониться в область сильного поля; в случае антипараллельного расположения он должен отклониться в область слабого поля. Величина отклонения может быть вычислена по формуле, подобной записанному на стр. 97 выражению для силы, действующей на магнитную стрелку.

Первое, что приходит в голову, это то, что магнитные моменты атомов расположены как попало. Раз так, то мы ожидаем размытия пучка.

Но опыт привел к совершенно иным результатам. Пучок атомов никогда не размывается, он расщепляется на две, три, четыре и более компонент в зависимости от сорта атомов. Расщепление всегда симметричное. В некоторых случаях в числе компонент пучка присутствует неотклоненный луч, иногда неотклоненного луча нет, и, наконец, бывает и так, что пучок вовсе не расщепляется.

Из этого опыта, который без сомнения является одним из важнейших экспериментов, сделанных физиками когда-либо, следует, во-первых, что движение электронов около атома действительно можно уподобить электрическому замкнутому току. Уподобить в узком и вполне определенном смысле: так же как и замкнутым токам, атомам можно присвоить магнитный момент. И, далее, магнитные моменты атомов могут образовывать лишь некоторые дискретные углы с направлением вектора магнитной индукции. Иными словами, проекции магнитных моментов на это направление квантуются.

Большим торжеством теоретической физики явилось то, что факты были предсказаны во всех деталях. Из теории следует, что момент импульса и магнитный момент электрона, обязанные своим происхождением движению атомных электронов в поле ядра (эти моменты называются орбитальными *)), антипараллельны, а их проекции на направление поля могут быть записаны в виде:

$$L_z = m \frac{h}{2\pi}, \quad M_z = m\mu.$$

Здесь m — целое число, которое может принимать значения 0, 1, 2, 3, ...; $h/2\pi$ — наименьшее значение проекции момента импульса; μ — наименьшее значение проекции магнитного момента. Величины h и μ

*) Такое название установилось по историческим причинам: ведь теория атома началась с предположения, что атом похож на Солнечную систему.

находятся из опытов:

$$h = 6,62 \cdot 10^{-27} \text{ эрг} \cdot \text{с}; \quad \mu = 0,93 \cdot 10^{-20} \text{ эрг/Гс.}$$

Добавим еще, что эти важные для физики постоянные величины носят имена великих ученых, заложивших основы квантовой физики: h называют постоянной Планка, μ — магнетоном Бора.

Однако постулаты квантовой механики оказались недостаточными, чтобы разобраться в различном характере расщепления пучков атомов разных элементов. Даже простейшие атомы — атомы водорода — вели себя неожиданно. Пришлось к законам квантовой механики добавить еще одну исключительно важную гипотезу, о которой мы уже мельком упоминали. Электрону (а позже оказалось, что и любой элементарной частице) надо приписать собственный момент импульса (спин) и соответственно собственный магнитный момент. Чтобы понять неизбежность уподобления электрона магнитной стрелке, нам надо сначала познакомиться поподробней с характером движения атомных электронов.

ЭЛЕКТРОННОЕ ОБЛАКО АТОМА

Невозможно увидеть движение электрона. Более того, нельзя надеяться на то, что прогресс науки приведет нас к тому, что мы увидим электрон. Причина достаточно ясна. Чтобы «увидеть», надо «осветить». Но «осветить» — это значит подействовать на электрон энергией какого-либо луча. Электрон же настолько мал, обладает столь крошечной массой, что всякое вмешательство с помощью прибора для рассматривания неизбежно приведет к тому, что электрон уйдет с того места, где он находился ранее.

Не только те скромные сведения о строении атомов, которые сейчас будут сообщены читателю, но и все стройное учение об электронной структуре вещества являются плодом теории, а не эксперимента. Однако мы уверены в ее справедливости благодаря неисчислимому количеству наблюдаемых на опыте следствий, которые строжайшими логическими рассуждениями выводятся из теории. Картину электронного строения,

которую нельзя увидеть, мы устанавливаем с той же степенью уверенности, с которой Шерлок Холмс по следам, оставленным преступником, устанавливал картину преступления.

Огромным источником доверия к теории является уже то, что картина электронного строения предсказывается с помощью тех же законов квантовой физики, которые устанавливаются другими опытами.

Мы уже рассказали, что порядковый номер химического элемента в таблице Менделеева есть не что иное, как заряд его ядра или, что то же самое, число принадлежащих нейтральному атому электронов. У атома водорода один электрон, гелия — два, лития — три, бериллия — четыре и т. д.

Как же движутся все эти электроны? Ответ на этот вопрос далеко не прост, и ответ на него носит лишь приближенный характер. Сложность проблемы заключается в том, что электроны взаимодействуют не только с ядром, но и друг с другом. К счастью, оказывается, что взаимное отталкивание (избегание) электронов играет все же меньшую роль, чем движение, которое обязано взаимодействию электрона с ядром. Только это обстоятельство и позволяет сделать выводы о характере движения электронов в различных атомах.

Каждому электрону природой отведена пространственная область, внутри которой он движется. По форме этих областей электроны делятся на категории, обозначаемые латинскими буквами s , p , d и f .

Наиболее простой является «квартира» s -электрона. Она представляет собой сферический слой. Теория показывает, что электрон чаще всего бывает в центре сферического слоя. Так что говорить о круговой орбите такого электрона — это грубое упрощение.

Область пространства, в которой путешествует p -электрон, совсем иная. Она напоминает по форме физкультурную гантель. Другие категории электронов имеют еще более сложные области существования.

Для каждого из атомов таблицы Менделеева теория (уже, правда, с привлечением экспериментальных данных) может указать, сколько электронов того или иного сорта он содержит.

Имеет ли связь это распределение электронов по типам движения с их распределением по K , L , M , ...

энергетическим уровням, о котором мы рассказали в предыдущей главе? Самое прямое. Теория и опыт показывают, что электроны, относящиеся к K -уровню, могут быть только s -типа, относящиеся к L -уровню — s - и p -типа, к M -уровню — s -, p - и d -типа, и т. д.

Мы не станем сколько-нибудь подробно рассматривать электронное строение атомов. Ограничимся лишь перечислением электронной структуры первых пяти элементов таблицы. Атомы водорода, гелия, лития и бериллия имеют только s -электроны. Атом бора имеет четыре s -электрона и один p -электрон.

Сферическая симметрия области пространства, в которой путешествует s -электрон, ставит под сомнение наши рассуждения о магнитном моменте атома, содержащего один электрон. Действительно, раз момент импульса может принимать одинаковые и направленные с равной вероятностью во все стороны значения, то в среднем вращательный момент, а значит и магнитный момент такой системы должны равняться нулю. К этому естественному выводу приходит и квантовая физика: атомы, содержащие только s -электроны, не могут иметь магнитного момента.

Но если так, то пучки атомов первых четырех элементов таблицы Менделеева не должны отклоняться в неоднородном магнитном поле. А на самом деле? Оказывается, что это предсказание не выполняется для атомов водорода и лития. Пучки этих атомов ведут себя исключительно странно. В обоих случаях поток атомов расщепляется на две компоненты, отклоненные в противоположные стороны на одинаковые расстояния от первичного направления. Непонятно!?

МАГНИТНЫЕ МОМЕНТЫ ЧАСТИЦ

Спин электрона появился на сцене в 1925 году. Необходимость введения его в число участников событий, разыгрываемых в микромире, показали Абрахам Гаудсмит и Джордж Уленбек. Предположив, что электрон обладает собственным моментом импульса, эти исследователи показали, что все недоразумения, накопившиеся к тому времени при интерпретации атомных спектров, естественно разрешаются.

Опыты по расщеплению атомных пучков были проведены чуть позднее. И когда оказалось, что и здесь лишь с помощью понятия спина удается дать исчерпывающее объяснение наблюдаемым фактам, лишь тогда все физики поверили в спин.

Прошло еще немного времени и выяснилось, что собственный вращательный момент — спин — является свойством, присущим не только электрону, но и всем элементарным частицам.

Мы уже говорили, что название «спин» свидетельствует о естественной тяге к наглядности. Поскольку момент импульса вошел в физику как характеристика вращающегося твердого тела, то, выяснив, что для спасения закона сохранения элементарным частицам надо приписать некое значение момента импульса, многие физики тут же прибегли к наглядной картине вращения частицы около своей оси. Это наивное представление не выдерживает критики: говорить о вращении элементарной частицы около своей оси можно не с большим правом, чем рассуждать о вращении около своей оси математической точки.

Сторонники наглядности сумели из неких косвенных соображений оценить размер электрона, точнее — установить, что если это понятие и применимо к электрону, то размер электрона должен быть меньше определенной величины. Величина спина известна — мы приведем ее значение через несколько строк. Полагая, что электрон имеет форму, можно вычислить, с какой скоростью вращаются «точки его поверхности». Оказывается, эта скорость больше скорости света. Упорство привело бы к необходимости расстаться с теорией относительности.

Пожалуй, наиболее убийственным доводом против наглядности является то, что нейтрон, который не несет на себе электрического заряда, обладает спином. Почему же этот довод является решающим? Судите сами.

Если частицу можно было бы представлять в виде заряженной сферы, то ее вращение около оси давало бы нечто вроде амперова тока. Но раз уж нейтральная частица обладает моментом импульса, а также и магнитным моментом (об этих свойствах нейтрона мы скажем несколько слов в четвертой книге), об аналогии с амперовым током не может быть и речи.

Конечно, не стоит становиться в позу пророка и говорить, что никогда не удастся объяснить спин и магнитный момент элементарных частиц, исходя из какого-то более общего, пока что не открытого закона (частично эта задача решается теорией замечательного английского физика Поля Дирака; но о ней мы не можем дать читателю даже общее представление — уж слишком она абстрактна). Однако сегодня мы должны считать «стрелочки», изображающие момент импульса и магнитный момент частицы, первичными (не сводящимися к чему-либо более простому) понятиями.

Лет пятьдесят назад большинство физиков держалось точки зрения Эйнштейна, который писал: «Всякая физическая теория должна быть такой, чтобы ее, помимо всяких расчетов, можно было проиллюстрировать с помощью простейших образов». Увы, мнение великого человека оказалось неверным. И уже много лет физики спокойно оперируют теориями, в которых фигурируют измеряемые величины, которым мы не можем сопоставить зрительного образа.

У электрона и других элементарных частиц нет «полюсов». В ряде случаев мы уверенно говорим об этих частицах как точечных, соглашаясь с тем, что понятие формы к элементарным частицам неприменимо, и, тем не менее, мы вынуждены приписать частицам два векторных свойства — момент импульса (спин) и магнитный момент. Эти два вектора всегда лежат вдоль одной линии. Иногда они параллельны, а в других случаях антипараллельны.

Опыт показывает, что общие формулы для проекций момента импульса и магнитного момента, которые мы привели на стр. 100, справедливы и для собственных моментов. Все эксперименты, как спектральные, так и по расщеплению пучков атомов в неоднородном магнитном поле, безупречно истолковываются, если для электрона число m в формуле для проекции момента импульса разрешить принимать два значения: $\pm 1/2$. Что же касается формулы для проекции магнитного момента, то здесь число m может принимать два значения: ± 1 .

Спин электрона имеет численное значение $\frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$ и может располагаться лишь в двух направлениях —

вдоль поля и против поля. Что же касается магнитного момента электрона, то он, следуя за спином, также может иметь лишь две ориентации в поле, а численное его значение равно одному магнетону Бора.

Перейдем теперь к объяснению результатов опытов с атомными пучками. Покажем, как легко разъясняются с помощью понятия спина все особенности расщепления атомных пучков.

Действительно, как понять, что пучки атомов гелия и бериллия не расщепляются? Вот как. Орбитальный момент у электронов этих атомов отсутствует по той причине, что они относятся к «сорту» s . Что же касается спинов электронов, то они смотрят в противоположные стороны. Вообще-то говоря, это утверждение ниоткуда не вытекает, хотя интуитивно представляется вполне естественным. Принцип, по которому пара электронов в атоме устраивается так, чтобы направления их спинов были противоположны, носит название принципа Вольфганга Паули (1900—1958).

Как много гипотез!.. Да, не мало. Но все они вместе образуют стройное здание квантовой физики, из которой вытекает столь много следствий, что ни малейшего сомнения в справедливости того, что электрону надо приписать спин, что значение спинового числа надо положить равным $1/2$ и что спины пары электронов надо подчинить принципу Паули, ни тени сомнения на этот счет не остается ни у одного физика. Сумма этих гипотез отражает структуру микромира.

Вернемся к нашим атомным пучкам. Мы объяснили, почему не расщепляются потоки атомов гелия и бериллия.

Ну, а как ведут себя водород и литий?

У водорода один электрон. Орбитальный момент его равен нулю, поскольку это s -электрон. Проекция спина электрона может принять лишь два значения: плюс $1/2$ и минус $1/2$, т. е. спин может установиться против или вдоль направления магнитного поля. Поэтому поток атомов и расщепится на две компоненты. То же самое произойдет с атомами лития, поскольку два электрона «скомпенсируют» свои спины, а третий будет вести себя так же, как единственный электрон атома водорода.

Точно так же будут вести себя атомы и других элементов, которые содержат в верхней оболочке один неспаренный электрон.

Мне потребовалось бы привести без доказательства еще некоторые теоремы, доказываемые в квантовой физике, для того, чтобы для атомов других элементов объяснить расщепления на большое число компонент. Учитывая, что лишь s -электроны не обладают орбитальным моментом и что спин электрона проявит себя лишь в том случае, когда электрон находится на своем энергетическом уровне в одиночестве, физики сумели полностью объяснить поведение потоков атомов всех сортов. Изучив эту увлекательную главу физики, даже самый большой скептик уверится в том, что все бездоказательные предположения, которые приняты в квантовой физике, являются общими законами природы.

Боюсь, что многие читатели останутся неудовлетворенными этими фразами. Конечно, только опытов по отклонению атомных пучков в неоднородном магнитном поле недостаточно для того, чтобы ввести такое «странное» понятие, как спин. Но книга наша уж слишком маленькая, чтобы я мог привести огромное количество фактов, которые требуют признания за спином прав гражданства.

Чего, например, стоит не имеющее ничего общего с рассказанным явление магнитного резонанса. Радиоволны сантиметрового диапазона поглощаются веществом, когда им приходится перевернуть спин. Энергия взаимодействия магнитного момента электрона с постоянным магнитным полем, в которое помещают вещество в опытах по магнитному резонансу, а значит и разность двух энергий (параллельное расположение и антипараллельное расположение) вычисляются без труда. Эта разность равна кванту поглощаемой электромагнитной волны. С огромной точностью мы определяем значение частоты волны из эксперимента и убеждаемся в абсолютном совпадении этого значения с тем, которое мы вычислили, зная индукцию поля и величину магнитного момента электрона.

Это явление лежит в основе большого раздела науки: учения об электронном резонансе. Замечательно, что те же события, но, естественно, в другом диапазоне длин волн наблюдаются для атомных ядер. Ядерный маг-

нитный резонанс является важнейшим методом изучения химического строения вещества.

Прежде чем пойти дальше, будет, пожалуй, полезно подвести итог всем фактам, которые касаются систем, создающих магнитные поля и откликающихся на присутствие магнитного поля.

Прежде всего надо подчеркнуть еще раз, что гипотеза Ампера оказалась лишь частично справедливой: магнитные поля создаются не только движущимися электрическими зарядами. Другим источником магнитного поля являются элементарные частицы и в первую очередь электроны, обладающие собственным магнитным моментом. Техническая классификация взаимодействий, приведенная на стр. 90, оказывается несовершенной. Магнитные поля создаются естественными и искусственными магнитами, электрическими токами (в том числе и потоками электрических частиц в вакууме), а также элементарными частицами. Эти же системы, а также частицы, подвержены действию магнитного поля.

Основной величиной, которая характеризует магнитное поле и его действия, является вектор магнитного момента. В случае токов этот вектор определяется формой контура тока. Момент стрелки сложным образом связан с атомным строением вещества, но его нетрудно измерить. Электроны, движущиеся в поле ядра, обладают «орбитальным» магнитным моментом, как если бы (обратите, пожалуйста, внимание на это «как если бы») их движе-

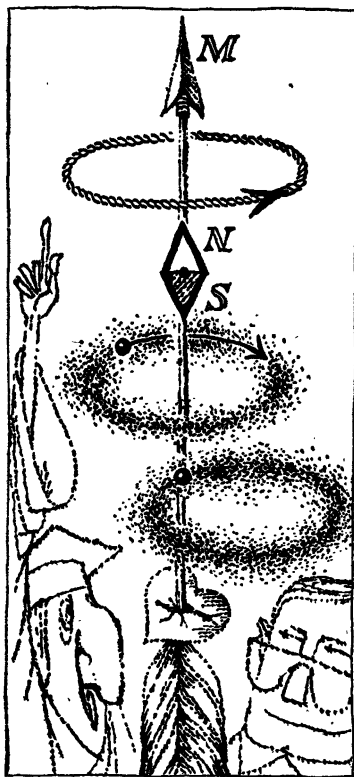


Рис. 3.6.

ние вокруг ядра создавало бы электрический ток. И, наконец, собственный магнитный момент является первичным свойством, которое характеризует элементарные частицы.

Чтобы вы лучше запомнили эти фундаментальные сведения, приводится рис. 3.6. Этот рисунок — итог наших сегодняшних сведений о «магнитной душе», или, если хотите, о магнитном сердце. Ведь по-французски магнит называется «*aimant*» (от глагола *aimer* — любить). Рисунок подчеркивает, что макроскопический ток, стержневой магнит, орбитальное движение электрона и сам электрон — все они характеризуются одним физическим понятием.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНАЯ ИНДУКЦИЯ

Опыт показывает, что пучок электронов, движущихся в магнитном поле, отклоняется от прямолинейного пути. Как было сказано на стр. 92, эта сила, получившая название силы Лоренца, направлена перпендикулярно магнитным силовым линиям и вектору скорости электронов. Ее величина определяется формулой $F = evB$. Это самое простое выражение силы Лоренца, справедливое в том случае, когда скорость электронов и направление магнитного поля образуют прямой угол.

Если к этому факту добавить нашу уверенность, что в металлическом проводнике содержатся свободные электроны, то путем простых рассуждений мы приходим к выводу, что при некоторых движениях проводников в магнитном поле в них должен возникать электрический ток.

Это явление, которое, можно сказать, лежит в основе всей современной техники, носит название

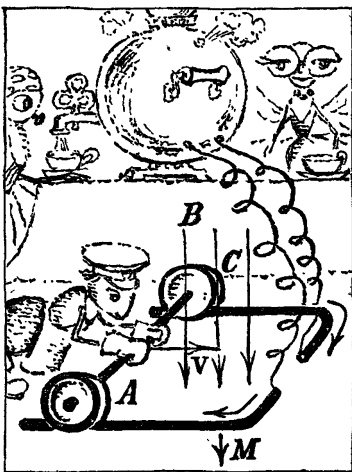


Рис. 3.7.

электромагнитной индукции. Сейчас мы выведем его закон.

На рис. 3.7 изображен проводящий контур, представляющий собой катящийся по металлическим проводам стержень AC длины l , который может перемещаться между полюсами магнита, не нарушая замкнутости контура. Если стержень движется перпендикулярно силовым линиям, то на электроны проводника будет действовать сила, и по контуру пойдет электрический ток.

Мы приходим к выводу, важность которого невозможно переоценить: электрический ток может возникать в замкнутом проводнике, хотя в цепь не входит аккумулятор или другой источник тока.

Вычислим ЭДС, т. е. работу, которая требуется для того, чтобы перенести единицу заряда вдоль замкнутого контура. Работа равняется произведению силы на путь. Она происходит только на участке, который перемещается в поле. Длина пути равна l , а сила на единицу заряда равна vB .

Возникшую электродвижущую силу называют ЭДС индукции. Ее значение определяется формулой

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = vBl.$$

Желательно обобщить эту формулу так, чтобы она была пригодна для любого движения любых проводящих контуров. К этому обобщению мы придем следующим образом. За время τ проводящий стержень передвинулся на длину x , скорость движения v была x/τ . Площадь проводящего контура уменьшилась на величину $S = xl$. Формула ЭДС индукции приобретает вид:

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = BS/\tau.$$

Но каков смысл числителя формулы? Он достаточно очевиден: BS — это величина, на которую изменился магнитный поток (число силовых линий), пронизывающий контур.

Конечно, наше доказательство проведено для очень простого случая. Читателю придется поверить мне на слово, что это доказательство можно провести совершенно строго для любого примера. Полученная формула имеет самое общее значение, и закон электромагнитной индукции формулируется так: ЭДС индукции

возникает всегда в том случае, когда меняется число силовых линий, пронизывающих контур. При этом величина ЭДС индукции численно равна изменению магнитного потока в единицу времени.

Существуют и такие перемещения контура в магнитном поле, при которых ток не возникает. Тока не будет, если контур двигать в однородном поле параллельно силовым линиям. Если же вращать контур в однородном магнитном поле, то ток возникает. Ток будет возникать также, если приближать или удалять контур от полюса стержневого магнита.

Но опыт показывает, что сделанное нами обобщение еще более многозначительно. Пока что речь шла о случаях, когда контур тока и источник магнитного поля меняли свое взаимное расположение. Последняя формула, которую мы вывели, ничего не говорит о движении. В ней идет речь лишь об изменении магнитного потока. Но ведь изменение магнитного потока через проводящий контур не обязательно требует перемещения.

Действительно, можно взять в качестве источника магнитного поля не постоянный магнит, а контур или, еще лучше, катушку, по которой пропускать электрический ток от любого стороннего источника. При помощи реостата, или любым другим способом, можно изменять силу тока в этой первичной катушке, являющейся источником магнитного поля. Тогда магнитный поток, пронизывающий контур, будет меняться при неизменном расположении источника магнитного поля и проводящего контура (рис. 3.8).

Будет ли наше обобщение работать в этом случае? На этот вопрос отвечает опыт. И ответ оказывается положительным. Вне зависимости от того, каким

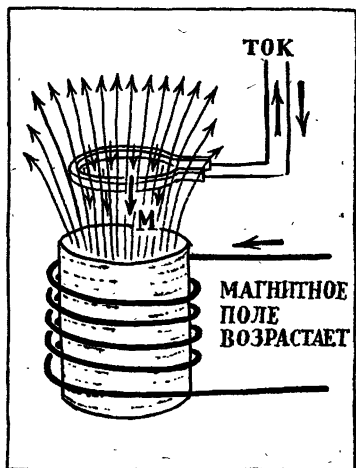


Рис. 3.8.

образом меняется число силовых линий, формула ЭДС, фигурирующая на предыдущей странице, остается в силе.

НАПРАВЛЕНИЕ ИНДУКЦИОННОГО ТОКА

Сейчас мы покажем, что существует одно простое универсальное правило, касающееся направления возникающих индукционных токов. Рассмотрим несколько примеров, а потом сделаем из них общий вывод.

Возвращаясь к рисунку 3.7, обратим внимание на следующее. Если мы уменьшаем площадь контура, магнитный поток, проходящий через контур, уменьшается. Направление тока, показанное на рисунке, таково, что магнитный момент возникшего тока направлен вдоль силовых линий. Это значит, что собственное поле индуцированного тока направлено так, чтобы «помешать» уменьшению магнитного поля.

К тому же выводу мы придем для обратного случая. Если площадь контура увеличивается, то и поток, проходящий через контур, увеличится. Но теперь магнитный момент контура будет смотреть против силовых линий. То есть опять-таки поле возникшего индукционного тока мешает тому действию, которым оно вызвано.

Еще один пример. Пусть у нас контур расположен между полюсами магнита так, что поток, проходящий через него, равен нулю. Начнем поворачивать контур по часовой стрелке и против. Оба случая показаны на рис. 3.9. Сплошной линией обозначена проекция контура

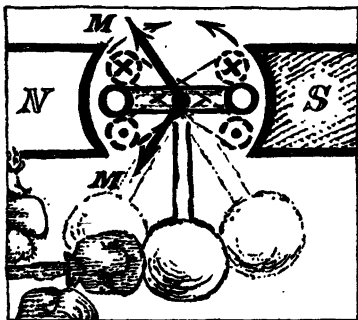


Рис. 3.9.

в начальном положении, пунктиром — проекции контура в повернутом положении, когда возник электрический ток. Пользуясь правилом левой руки, мы находим направление индукционных токов, которые возникают в обоих случаях. На нашем рисунке северный полюс изображен слева. Поэтому при вращении по часовой

стрелке магнитный момент индукционного тока смотрит вниз, а при вращении против стрелки — вверх. По мере увеличения угла поворота собственное магнитное поле контуров все в большей степени уменьшает поле, явившееся причиной индукции. Мы видим, что и здесь работает то же правило.

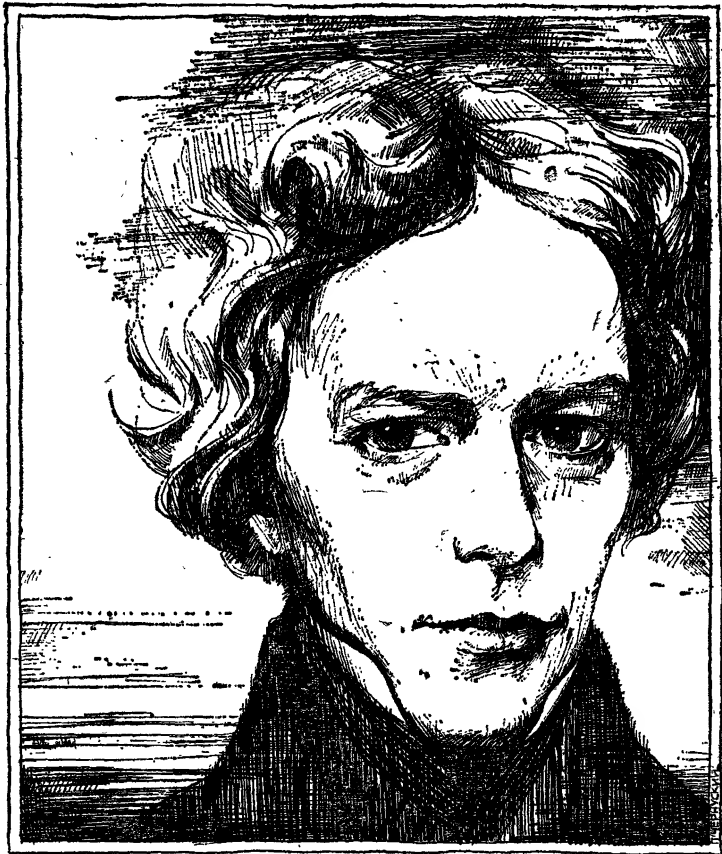
Теперь посмотрим, как будут вести себя контура в неоднородных полях. Вернемся к рис. 3.8. Предположим, что сила тока электромагнита неизменна, и рассмотрим, что произойдет при перемещении контура. Если приближать контур к северному полюсу, то магнитный момент будет смотреть против силовых линий. Если бы контур удалялся, то собственное поле индуцированного тока усиливало бы поле. Можно доказать такое поведение, пользуясь опять правилом левой руки.

А как будет обстоять дело в случае магнитных полей, создаваемых переменными токами? Увеличение или уменьшение силы тока в первичной катушке приводит к изменению потока. В контуре (опять взгляните на рис. 3.8) возникает ЭДС.

А как определить направление тока? Теперь уже правилом руки не воспользуешься, поскольку движения нет. Вот здесь-то наше обобщение и пригодится. Окажется, что и в этом случае направление индукционного тока, возникшего благодаря уменьшению или увеличению числа силовых линий, пронизывающих контур, будет подчиняться все тому же правилу: индукционный ток будет создавать такое поле, которое как бы компенсирует изменение магнитного поля, явившееся причиной индукции.

К ИСТОРИИ ОТКРЫТИЯ ЗАКОНА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЙ ИНДУКЦИИ

Открытие явления электромагнитной индукции относится к считанным по пальцам руки событиям, оказавшим решающее влияние на прогресс человечества. Поэтому было бы непростительно не остановиться на истории этого открытия. Оно было сделано намного раньше, чем было исследовано поведение пучка электронов в магнитном поле, и исторический ход событий вовсе не совпадает с тем изложением, которое мы из-



МАЙКЛ ФАРАДЕЙ (1791—1867) — великий английский физик. Ему принадлежит открытие явления электромагнитной индукции (1831 г.). Фарадей сделал это открытие не случайно — он искал его. Законы электромагнитной индукции Фарадея лежат в основе электротехники.

Трудно переоценить значение установленных Фарадеем законов электролиза. Великим ученым введены в обиход и разъяснены такие привычные сегодня термины, как анод, катод, анион, катион, ион и электролит.

Фарадей доказал, что промежуточная среда влияет на электрическое взаимодействие.

Нельзя не упомянуть открытие магнитного вращения плоскости поляризации. То, что все тела относятся либо к парамагнетикам, либо к диамагнетикам, также установлено Фарадеем.

Мир не знал более великого физика-экспериментатора, чем Майкл Фарадей.

брали в предыдущем параграфе: логика и последовательность мышления вовсе не обязаны идти в параллель с историческим ходом событий.

К моменту, когда Фарадей приступил к своим опытам, приведшим к открытию электромагнитной индукции, ситуация в учении об электрических и магнитных полях была следующей.

Получение постоянного тока и закономерности его поведения в электрических цепях уже не представляли серьезных проблем для физиков. Было установлено воздействие тока на постоянный магнит и взаимодействие токов между собой. Стало ясным, что постоянный ток создает вокруг себя магнитное поле, которое может быть измерено как с помощью магнита, так и с помощью другого тока. А не существует ли обратного явления, не создает ли магнитное поле ток в проводнике?

В 1821 г. Фарадей оставляет в своем дневнике следующую запись: «Превратить магнетизм в электричество». Десять лет потребовалось великому ученому для того, чтобы добиться успеха. Многолетние неудачи объясняются тем, что Фарадей пытался получить ток, помещая проводник в постоянное поле. В 1831 г. настойчивые усилия ученого увенчались успехом. Приводимая ниже цитата из статьи Фарадея 1831 г. — первое описание открытого явления.

«На широкую деревянную катушку была намотана медная проволока длиной 203 фута и между витками ее намотана проволока такой же длины, изолированная от первой хлопчатобумажной нитью. Одна из этих спиралей была соединена с гальванометром, а другая с сильной батареей... При замыкании цепи удавалось увидеть внезапное, но довольно слабое действие на гальванометр, и то же самое замечалось при прекращении тока. При непрерывном же прохождении тока через одну из спиралей ни действия на гальванометр, ни вообще какого-нибудь действия на другую спираль не обнаружилось, несмотря на то, что нагревание всей спирали, соединенной с батареей, и яркость искры, проскакивающей между углями, свидетельствовали о мощности батареи».

Открытие явления электромагнитной индукции было первым этапом двадцатилетнего труда Фарадея,

целью которого было найти единую связь между всеми электрическими и магнитными явлениями.

Но, говоря об электромагнитной индукции, следует упомянуть имена и других выдающихся физиков. Англичанину Джозефу Генри (1797—1878) принадлежит открытие явления самоиндукции. Если ток, текущий по катушке, изменяется, то изменяется магнитное поле, создаваемое этим током, изменяется поток поля, проходящий через саму катушку, индуцируется ЭДС в «своем» контуре.

А кто открыл закон направления ЭДС индукции? Наиболее полный ответ на этот вопрос можно найти в работах Ленца. Правило Ленца определяет направление индукционного тока. «Если металлический проводник перемещается вблизи тока или магнита, то в нем возникает гальванический ток. Направление этого тока таково, что покоящийся провод пришел бы от него в движение, прямо противоположное действительному перемещению. Предполагается, что провод может двигаться в направлении действительного движения или в прямо противоположном направлении».

После 1840 г. шаг за шагом создается единая картина электромагнетизма. Открытие электромагнитных волн — последний и, наверное, самый яркий штрих в этой картине.

ВИХРЕВЫЕ ИНДУКЦИОННЫЕ ТОКИ

Если индукционные токи могут возникать в проводящих проводниках, то достаточно естественно и то, что они появляются в массивных сплошных кусках металла. Каждый кусок металла содержит свободные электроны. Если металл движется в постоянном магнитном поле, то на свободные электроны будет действовать сила Лоренца. Электроны будут описывать круговые траектории, т. е. образовывать вихревые токи. Это явление в 1855 г. обнаружил французский физик Леон Фуко (1810—1868).

Законы электромагнитной индукции одинаково справедливы, меняется ли магнитный поток благодаря относительному перемещению металла и источника поля или изменение магнитного поля происходит из-за перемены

электрического тока, создающего поле. Поэтому токи Фуко проявляются не только тогда, когда имеет место относительное движение (самый яркий опыт — это опыт с монеткой, которую заставляют падать между полюсами сильного магнита; она падает не с обычным ускорением, а так, как если бы падение происходило в вязком масле; смысл опыта очевиден: в монетке возникают токи Фуко, направление которых, согласно правилу Ленца, таково, что их взаимодействие с первичным магнитным полем тормозит то движение, которым вызывается индукция), но и в том случае, когда магнитное поле меняется во времени.

Из полезных применений токов Фуко можно упомянуть следующие. Во-первых, токи Фуко используются в так называемых индукционных печах для сильного нагрева и даже плавления металлов. Во-вторых, во многих измерительных приборах они дают «магнитное успокоение».

Остроумным изобретением (это уже в-третьих) является счетчик электрической энергии. Вы, конечно, видели, что его основной частью является вращающийся диск. Чем больше лампочек или плиток вы включите, тем быстрее вращение диска.

Принцип устройства счетчика заключается в том, что создают два тока. Один из них течет в цепи, параллельной нагрузке, а другой — в цепи тока нагрузки. Эти два тока протекают в катушках, надетых на железные сердечники, их так и называют: «вольтова катушка» и «амперова катушка». Переменный ток намагничивает железные сердечники. Так как ток переменный, то полюса электромагнитов все время меняются. Между ними как бы бежит магнитное поле. Катушки располагают так, чтобы бегущее магнитное поле, создаваемое обеими катушками, образовывало в теле диска вихревые токи. Направление этих вихревых токов будет таково, что бегущее магнитное поле потянет за собой диск.

Быстрота вращения будет зависеть от величин токов в обеих катушках. Скорость вращения, как можно показать точными расчетами, будет пропорциональна произведению силы тока на напряжение и на косинус фазового сдвига, иными словами — потребляемой мощности. Мы не станем останавливаться на

простых механических приемах, с помощью которых вращающийся диск связывают с цифровым показателем.

Однако в большинстве случаев от токов Фуко стараются избавиться. Это один из предметов заботы конструкторов всевозможных электрических машин. Как и любые токи, вихревые токи поглощают энергию системы. При этом энергетические потери могут быть настолько значительны, что становится необходимым прибегать ко всяким ухищрениям. Самым простым методом борьбы с токами Фуко является замена в электрических машинах кусков сплошного металла листовым материалом. В этом случае вихревым токам негде «развернуться», сила их становится существенно меньшей, и соответственно падают тепловые потери.

Несомненно, читатель обращал внимание, что электрические трансформаторы греются. Нагрев трансформаторов по крайней мере наполовину происходит за счет вихревых токов.

ИНДУКЦИОННЫЙ ТОЛЧОК

Используя явление электромагнитной индукции, можно разработать весьма совершенные методы измерения магнитного поля. До сих пор мы предлагали для этой цели пользоваться магнитной стрелкой или пробным магнитным контуром, по которому протекает постоянный электрический ток известной силы. Магнитная индукция определялась величиной момента силы, действующего на пробный контур или стрелку, магнитный момент которых равен единице.

Теперь поступим иначе. Крошечный виток тока подключим к измерительному прибору. Установим виток в положение, перпендикулярное силовым линиям, затем быстрым движением повернем его на 90 градусов. За время поворота по катушке пробежит индукционный ток, протечет вполне определенное количество электричества Q , которое можно измерить. Как же это количество электричества будет связано с величиной поля в той точке, где мы поместили пробный виток?

Расчет достаточно прост. Сила тока I равняется по закону Ома частному от деления ЭДС индукции на

сопротивление, т. е.

$$I = \frac{1}{R} \mathcal{E}_{\text{инд.}}$$

Если воспользоваться выражением для закона индукции $\mathcal{E}_{\text{инд}} = BS/\tau$ и учесть, что $Q = I\tau$, то магнитная индукция окажется равной:

$$B = \frac{\mathcal{E}_{\text{инд}}\tau}{S} = \frac{I\tau R}{S} = \frac{QR}{S}.$$

Конечно, повторим еще раз, эта формула верна в том случае, если в конечном положении силовые линии не проходят через виток, а в начальном пересекают площадь витка под прямым углом. Впрочем, что является конечным, а что начальным положением витка — совершенно безразлично. От перемены изменится лишь направление тока, но не количество протекшего через контур электричества.

Чувствительность этого метода измерений возрастает в n раз, если вместо витка взять катушку. Количество электричества будет пропорционально числу витков n . Хорошие экспериментаторы умудряются изготавливать катушечки размером в миллиметр, так что методом индукционного толчка можно прощупать поле весьма детально.

Однако, вероятно, наибольшее значение метод индукционного толчка имеет при измерении магнитной проницаемости железных тел. Сейчас у нас пойдет речь об этом важном свойстве железа.

МАГНИТНАЯ ВОСПРИИМЧИВОСТЬ ЖЕЛЕЗА

Как мы выяснили в предыдущей главе, атомы обладают магнитными свойствами. Магнитный момент имеют одиночные электроны, орбитальные магнитные моменты создаются движением электронов около ядра. Ядра атомов обладают магнитными моментами. Поэтому внесение тела в магнитное поле должно сказываться на виде поля и, наоборот, наличие магнитного поля будет в той или иной степени сказываться на поведении твердых, жидких и газообразных веществ.

Совершенно выдающимися магнитными свойствами обладают железо, его некоторые сплавы и кое-какие

вещества, родственные железу. Этот небольшой класс веществ носит название ферромагнетиков. Можно проделать, например, такие опыты: подвешивать на ниточке маленькие стерженьки размером в спичку и подносить к ним магнит. Из каких бы других веществ мы ни изготавливали стерженьки — из дерева, стекла, пластмассы, меди, алюминия,... — приближение к ним магнита не поможет выявить магнитные свойства этих веществ. Чтобы доказать наличие магнитных свойств у любых веществ, нужно поставить тонкие и тщательные опыты, о которых у нас пойдет речь ниже.

Но железные тельца будут вести себя совершенно иначе. Они будут послушно двигаться вслед за самым слабеньким школьным стержневым магнитом.

Чтобы читатель мог судить о том, сколь чувствительны железные тела к присутствию магнитного поля, я расскажу следующую поучительную во всех смыслах историю, коей я был главным действующим лицом.

Несколько лет назад меня попросили ознакомиться с опытами чешского «кудесника», который приобрел мировую славу и был прозван падкими на сенсации американскими журналистами «чешским Мерлином». Этот деятель имел в своем репертуаре несколько десятков опытов, которые якобы не удалось рационально объяснить. Сам же чешский Мерлин приписывал результаты этих опытов своей силе внушения.

Одним из его коронных номеров было намагничивание деревянной спички. Сначала он показывал, что подвешенная на нити деревянная спичка не отклоняется магнитом. После этого начинал «гипнотизировать» спичку, делал некоторые таинственные пассы. Непременным элементом этого спектакля являлось приведение спички в соприкосновение с металлическим «идолом», который, как объяснил Мерлин, являлся приемником его психической энергии.

Потрудившись пару недель, я показал, что все без исключения опыты чешского кудесника имеют рациональное объяснение. Но как же ему удавалось намагнитить спичку? Как добивался он того, что после всех его пассов, будучи снова подвешенной к той же нитке, спичка начинала послушно следовать за магнитом?

Оказалось следующее. При соприкосновении с металлическим «идолом» на конец спички переходило нич-

тожное количество железной пыли. Я показал, что достаточно одной тридцатимиллионной доли грамма железа для того, чтобы спичка приобрела заметные магнитные свойства. Вот вам второй случай «опытов с тараканами».

Этот пример достаточно ярко показывает, что, во-первых, не следует верить «чудесам», противоречащим законам природы, и, во-вторых, — а именно это нас сейчас и интересует, — что магнитные свойства железа являются совершенно особыми.

Классический опыт, с помощью которого характеризуют магнитные свойства железа, ставится так. Составляется электрическая цепь, состоящая из двух надетых друг на друга катушек. Первичная катушка включена в цепь аккумулятора, вторичная катушка подключена к прибору, измеряющему количество электричества. Если замкнуть первичную цепь, то магнитный поток через вторичную катушку изменится от нулевого значения до некоторого предельного значения Φ_0 . Методом индукционного толчка магнитный поток может быть измерен с большой точностью.

С помощью описанной установки и производят изучение магнитных свойств веществ. Изготавливается стержень, который вставляется внутрь катушки. Сравниваются результаты двух измерений: без стержня и со стержнем. В случае, если стержень сделан из железа или других ферромагнитных материалов, количество электричества, измеренное прибором, возрастает в несколько тысяч раз.

За характеристику магнитных свойств материала можно принять отношение магнитных потоков, измеренных при наличии стержня и в его отсутствие. Это отношение $\mu = \Phi / \Phi_0$ носит название магнитной восприимчивости вещества.

Итак, железное тело резко увеличивает поток силовых линий. Это может иметь единственное объяснение: само железное тело добавляет к магнитному полю электрического тока первичной катушки свое собственное магнитное поле.

Разность $\Phi - \Phi_0$ обозначают обычно буквой J . Таким образом, $J = (\mu - 1) \Phi_0$ представляет собой добавочный магнитный поток, создаваемый самим веществом.

После того как опыт по измерению магнитной восприимчивости закончен и стержень вынут из катушки, мы обнаружим, что железный стержень сохраняет намагниченность. Она будет меньше, чем J , но тем не менее будет весьма значительной.

Остаточный магнетизм железного стержня можно снять. Для этого его надо поместить снова в наш прибор, но теперь уже так, чтобы собственное поле металла и поле электрического тока первичной катушки были направлены в разные стороны. Всегда удастся подобрать такой первичный ток, чтобы с помощью индукционного толчка противоположного направления снять магнитные свойства железа и привести его в исходное состояние. По историческим причинам, на которых мы не станем останавливаться, величина размагничивающего поля носит название коэрцитивной силы.

Это своеобразное свойство ферромагнитных материалов сохранять магнетизм в отсутствие тока и возможность уничтожения этого остаточного магнетизма электрическим током соответствующего направления называется гистерезисом. Каково происхождение этого слова? Понять не трудно. Нельзя заранее сказать, чему равно μ железа. Это зависит от предшествующих событий — был или не был намагничен образец, а если был, то насколько сильно. Короче говоря, магнитная проницаемость зависит от истории образца. Это и отображено в термине «гистерезис», — ведь по-английски история — history.

В зависимости от технических требований бывают нужны ферромагнитные материалы с разными свойствами. У магнитного сплава пермаллой μ приближается к 100 000, у мягкого железа максимальные значения μ в четыре раза меньше.

Возможность увеличить поток магнитных силовых линий в огромное число раз, помещая железное тело внутри проволочной катушки, приводит к созданию электромагнитов. Разумеется, сила электромагнита, т. е. способность его притягивать и удерживать железные тела большой тяжести, растет с величиной тока, пропускаемого по обмотке электромагнита. Процесс этот не беспределен — существует явление насыщения. Впрочем, не так уж просто добраться до насыщения, когда речь идет о массивных магнитах.

В последние годы для получения особенно сильных магнитных полей прибегают к сверхпроводящей обмотке. Работа при сверхнизких температурах ставит инженера перед большими техническими трудностями. Но зато уж здесь мы можем быть уверены, что выжали из ферромагнетиков все, что они могут дать, ибо μ падает с увеличением температуры.

По достижении некоторого температурного рубежа, например 767°C для железа, 360°C для никеля, ферромагнитные свойства исчезают и магнитная проницаемость становится близкой к единице, как у всех других тел.

ДОМЕНЫ

Главная особенность ферромагнетиков — это их доменное строение. Домен — это область, намагниченная до предела. Внутри домена все атомы выстроены так, что их магнитные моменты параллельны друг другу.

Поведение магнитных доменов совершенно такое же, как поведение электрических доменов в сегнетоэлектриках. Линейные размеры магнитных доменов не так уж малы, а именно порядка $0,01$ мм. Поэтому с помощью несложного ухищрения домены можно видеть в обычный микроскоп.

Для того чтобы сделать магнитные домены видимыми, на полированную поверхность ферромагнитного монокристалла наносят каплю коллоидной суспензии — тщательно раздробленного ферромагнитного вещества типа магнетита. Коллоидные частички концентрируются около границ доменов, так как вдоль границ магнитные поля особо сильны (совершенно так же обычные магниты собирают магнитные частички в области, близкой к своим полюсам).

Так же как и в сегнетоэлектриках, домены в ферромагнитных материалах присутствуют не только при наличии внешнего магнитного поля, но и когда образец ненамагничен.

Расположение доменов в ненамагниченном монокристалле таково, что суммарный магнитный момент кристалла равен нулю. Но отсюда не следует, что домены расположены как попало. И опять-таки в полной аналогии со сказанным на стр. 54 характер кристаллической структуры диктует некоторые направления,

в которых магнитным моментам выстраиваться легче всего. Кристаллы железа имеют кубическую элементарную ячейку, и направлениями легчайшего намагничивания являются оси куба. У других ферромагнитных металлов моменты выстраиваются вдоль диагоналей куба. Как бы то ни было, в ненамагниченном кристалле царит полный порядок в расположении доменов. При этом доменов с магнитными моментами, направленными в одну сторону, столько же, сколько доменов с магнитными моментами, направленными в противоположную сторону. Примеры доменной структуры мы уже приводили на рис. 2.3.

Намагничивание, так же как и поляризация, состоит в «поедании» доменов, моменты которых расположены под тупым углом к полю.

Борьба стремлений к порядку и беспорядку в расположении атомов является неперменной особенностью любого состояния вещества. Об этом подробно рассказано в книжке автора, изданной в этом же издательстве. Книжка называется «Порядок и беспорядок в мире атомов».

Как было выяснено во второй книге «Физики для всех», стремление к порядку — это стремление к минимуму энергии. Если тепловое движение мало, то предоставленные сами себе частицы образуют чудо атомной архитектуры — кристалл. Кристалл — это символ идеального порядка в мире атомов. Стремление к беспорядку диктуется законом возрастания энтропии.

При повышении температуры энтропийные тенденции берут верх и беспорядок становится господствующей формой существования материи.

В случае ферромагнитных материалов дело обстоит следующим образом. По мере повышения температуры магнитные моменты начинают раскачиваться. Вначале это колебание происходит в такт и не нарушает порядка, затем то один, то другой атом переворачивается и принимает «неправильное» расположение. Число таких атомов, «вышедших из строя», все время растет, и наконец при строго определенной температуре (температуре Кюри) происходит полное «плавление» магнитного порядка.

В этой книжке мне трудно объяснить, почему столь незначительное число веществ обладает ферромагнит-

ными свойствами. Какие именно детали в строении атомов поставили эти вещества в исключительное положение? Но читатель был бы слишком требователен к автору, если бы желал получить ответы на все вопросы в этой краткой популярной книге.

Перейдем к описанию поведения других веществ.

ДИАМАГНИТНЫЕ И ПАРАМАГНИТНЫЕ ТЕЛА

Как уже упоминалось, за исключением небольшого класса ферромагнетиков все остальные вещества имеют магнитную проницаемость, весьма близкую к единице. Тела, у которых μ слегка больше единицы, называются парамагнитными; тела, у которых магнитная проницаемость меньше единицы, называются диамагнитными. Приведем примеры веществ обоих классов с указанием значений их магнитной восприимчивости:

	μ		μ
Алюминий	1,000023	Серебро	0,999981
Вольфрам	1,000175	Медь	0,999912
Платина	1,000253	Висмут	0,999824

Несмотря на то, что отличия от единицы очень невелики, удается проводить весьма точные измерения. Для этой цели можно, вообще говоря, воспользоваться методом индукционного толчка, с которого мы начали рассказ о магнитных измерениях свойств вещества. Однако наиболее точные результаты получаются с помощью магнитных весов.

В одной из чашек аналитических микровесов (которые, как известно, способны измерять силы с точностью до десятимиллионных грамма) делается отверстие и пропускается нить, к которой подвешивается образец, помещаемый между полюсами магнита. Наконечники магнита должны быть сделаны так, чтобы поле было неоднородным. В этом случае тело либо втягивается, либо выталкивается из области сильного поля. Втягивается оно, когда магнитный момент образца

стремится установиться вдоль поля, выталкивается — в обратном случае. Формула силы приведена на стр. 97.

Образец уравнивается гирьками в отсутствие магнитного поля. После того как образец окажется в поле, равновесие нарушится. В случае парамагнитных веществ придется добавить гирек, в случае диамагнитных надо будет облегчить чашку весов. Нетрудно рассчитать, что хорошие весы помогут нам справиться с этой трудной задачей, ибо (в легко осуществимом случае неоднородности поля порядка сотых долей тесла на сантиметр) на 1 см^3 вещества будет действовать сила около миллиграмма.

Оба свойства — парамагнитные и диамагнитные — объясняются достаточно просто.

Диамагнетизм является непосредственным следствием того обстоятельства, что в магнитном поле каждый электрон будет описывать окружность. Эти круговые токи создают свои собственные магнитные моменты, которые будут направлены против поля, вызвавшего вращение.

Диамагнетизм является общим для всех веществ свойством.

Парамагнетизм и тем более ферромагнетизм «забывают» диамагнитные свойства вещества.

К парамагнетикам относятся те вещества, атомы или ионы которых обладают магнитным моментом. Момент может быть вызван орбитальным движением электронов, спином одиночного электрона или обеими причинами вместе взятыми.

Атомы диамагнитных веществ в отсутствие магнитного поля магнитным моментом не обладают. Атомы парамагнитных веществ обладают магнитными моментами, но благодаря тепловому движению они расположены в полном беспорядке — совершенно так, как у ферромагнитных тел выше точки Кюри. При наложении поля начинается борьба упорядочивающей силы поля с беспорядком, который вносит тепловое движение. По мере понижения температуры все большее число атомов устанавливается так, что их магнитный момент образует острый угол с направлением поля. Поэтому вполне понятно, что с понижением температуры магнитная восприимчивость парамагнитных тел возрастает.

МАГНИТНОЕ ПОЛЕ ЗЕМЛИ

Современный человек привык к тому, что любой прибор возникает вследствие развития какой-нибудь физической теории. Когда он создан, им занимаются инженеры, физикам уже делать нечего; природа явления, на котором основана работа прибора, была понята до его создания.

Совсем не так обстояло дело с компасом. Он вероятно возник в Китае в XI веке и в течение нескольких столетий использовался как главный навигационный прибор, однако при этом никто по-настоящему не понимал принцип его действия. Почему один конец стрелки всегда указывает на север? Большинство мудрецов объясняли поведение стрелки действием внеземных сил, например притяжением конца стрелки Полярной звездой.

В 1600 г. выходит в свет блестящий труд Уильяма Гильберта под названием «О магните и большом магните Земле». Строгий научный подход позволил ученому подойти вплотную к пониманию магнитных явлений. Выточив из куска магнитной руды шар, Гильберт тщательно исследовал ориентацию магнитной стрелки, подвешенной над разными его частями, и увидел полное сходство с ориентацией магнитной стрелки в разных

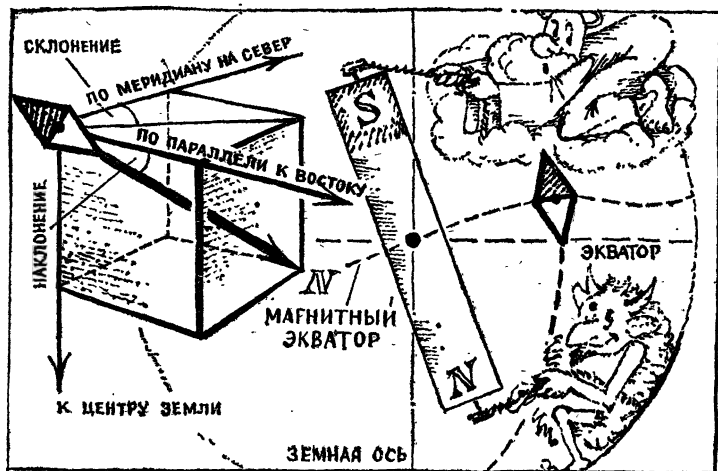


Рис. 3.10.

частях Земли. Отсюда был сделан вывод: действие компаса можно прекрасно объяснить, если предположить, что Земля представляет собой постоянный магнит, ось которого направлена вдоль земной оси.

С этого момента изучение геомагнетизма переходит на новый уровень. Более тщательное исследование показало, что магнитная стрелка направлена не совсем точно с севера на юг. Отклонение направления стрелки от меридиана, проведенного через данную точку, называют магнитным склонением. Магнитные полюса смещены по отношению к оси вращения Земли на $11,5^\circ$ (рис. 3.10). Стрелка не находится точно в горизонтальной плоскости, а поворачивается к горизонту под некоторым углом, называемым углом магнитного наклона. Исследуя магнитное наклонение в разных точках, можно сделать вывод, что магнитный «диполь» находится в глубине Земли. Он создает неоднородное поле, которое на магнитных полюсах достигает величины $0,6 \cdot 10^{-4}$ Т, а на экваторе равно $0,3 \cdot 10^{-4}$ Т.

Что же это за «магнит», который находится внутри Земли? Магнитный «диполь» находится в ядре Земли, которое состоит из расплавленного железа. Железо даже в расплавленном состоянии остается хорошим проводником электричества, и для объяснения магнитного поля Земли может быть предложена модель своеобразного «магнитного динамо». Мы не станем описывать эту модель. Читателю достаточно знать, что «земной магнит» создается токами, идущими внутри расплавленного железа.

Магнитное поле Земли меняется. Магнитные полюса перемещаются со скоростью 5—6 км в год. Это — ничтожное смещение в масштабах всей Земли; явление легко заметить в течение разве что сотни лет, поэтому оно получило название вековой вариации магнитного поля.

Не приходится доказывать, сколь существенным является точное знание элементов земного магнетизма в любом месте поверхности нашей планеты. Магнитный компас и до сего времени служит мореплавателям. Раз так, то они должны располагать картами магнитных склонений и наклонов. Вблизи полюсов северный конец магнитной стрелки, как видно из рисунка, уж совсем перестает смотреть на Север. Да и вблизи эк-

ватора трудно обойтись без карты магнитного поля. Магнитный экватор проходит совсем не там, где идет линия нулевых широт.

Знание магнитного поля на суше также представляет огромный интерес, так как служит целям геологической разведки. Мы не можем останавливаться на этих проблемах. Геологическая физика — важная и обширная глава науки, заслуживающая специального разговора.

Несколько слов о так-называемых палеомагнитных исследованиях, позволяющих судить о том, каким было магнитное поле Земли в далекие времена. Эти исследования опираются в основном на изучение остаточной намагниченности горных пород и пр.

Вот, например, в чем сущность методов, относящихся к доисторическому периоду. Кирпич и глиняная ваза имеют небольшую остаточную намагниченность, которая возникает в горячей глине при обжиге. Направление магнитного момента соответствует направлению магнитного поля в момент изготовления и охлаждения предмета. Иногда можно достаточно уверенно судить о положении этого предмета в момент изготовления.

А вот другой пример подобных исследований: изучается географическое направление магнитного момента руды, а ее возраст определяется по количеству радиоактивных изотопов.

Палеомагнитные исследования являются самым строгим доказательством дрейфов континентов. Оказалось, что намагниченности железных месторождений, возникших несколько сот миллионов лет назад на различных континентах, можно направить вдоль силовых линий магнитного поля, если собрать эти континенты в единый суперконтинент, названный Гондваной. Позже Гондвана раскололась на Африку, Австралию, Антарктиду и Южную Америку.

До сих пор мы говорили только о внутриземном происхождении магнетизма, и это действительно главный его источник. Однако некоторые изменения магнитного поля происходят из-за заряженных частиц, прилетающих извне. Это в основном токи протонов и электронов, испускаемые Солнцем. Заряженные частицы относятся полем к полюсам и вращаются там по окружности под действием сил Лоренца. Это приводит к двум

явлениям. Во-первых, движущиеся заряженные частицы создают дополнительное магнитное поле — магнитные бури. Во-вторых, они ионизуют молекулы атмосферных газов — возникает полярное сияние. Сильные магнитные бури возникают периодически (через 11,5 лет). Этот период совпадает с периодом интенсивности событий, протекающих на Солнце.

Непосредственные измерения при помощи космических аппаратов показали, что ближайшие к Земле тела — Луна, планеты Венера и Марс — не имеют собственного магнитного поля, подобного земному. Из других планет Солнечной системы лишь Юпитер и, по-видимому, Сатурн обладают собственными полями. На Юпитере обнаружены поля до 10 Гс и ряд характерных явлений (магнитные бури, синхротронное радиоизлучение и др.).

МАГНИТНЫЕ ПОЛЯ ЗВЕЗД

Магнетизмом обладают не только планеты и остывшие звезды, но также и раскаленные небесные тела.

Поскольку Солнце к нам ближе всего, то о его магнитном поле мы знаем больше, чем о магнитных полях других звезд. Магнитное поле Солнца можно наблюдать зрительно во время солнечного затмения. Вдоль силовых линий выстраиваются частицы солнечной материи, обладающие магнитным моментом, и обрисовывают картину силовых линий. Отчетливо видны магнитные полюса, и можно оценить величину магнитного поля, которая в некоторых областях размером порядка десятка тысяч километров превосходит силу магнитного поля Земли в тысячи раз. Эти участки называют солнечными пятнами. Поскольку пятна темнее остальных мест на Солнце, то ясно, что температура здесь более низкая, а именно на 2000 градусов меньше «нормальной» температуры Солнца.

Несомненно, что низкая температура и повышенные значения магнитного поля связаны между собой. Но хорошей теории, связывающей эти два факта, не существует.

Ну, а как дело обстоит на других звездах? Успехи астрофизики последних лет столь значительны, что ока-

залось возможным установить наличие магнитных полей на звездах. При этом «звездные магнитные пятна имеют температуру около 10 000 градусов и в течении нескольких месяцев могут менять свое положение, а то и исчезать совсем. Объяснить это изменение проще если принять, что не пятна на звездах меняют свое положение, а что вся звезда вращается.

О наличии магнитных полей судят по аномальным интенсивностям некоторых спектральных линий. Похоже, что магнитные звезды обладают повышенным содержанием железа на магнитном экваторе.

Магнитные поля в космосе очень невелики (миллионные доли гаусса). Это и объяснять не надо, ибо в космосе царит высочайший вакуум. Когда звезды образуются из рассеянных во Вселенной атомов, то сгущение звездной материи сопровождается «сгущением» магнитного поля. Но тогда почему же не все звезды обладают магнитным полем?

Земля существует миллиарды лет. Отсюда следует что магнитное поле Земли все время поддерживается протекающими внутри ее недр электрическими токами. Некоторые звезды, не обладающие магнитным полем видимо охладились настолько, что электрические токи внутри них прекратились. Однако это объяснение вряд ли является универсальным.

КОНСПЕКТ ЭЛЕКТРОТЕХНИКИ

СИНУСОИДАЛЬНАЯ ЭДС

Аккумулятор и батарея являются источниками постоянного тока. А вот электрическая сеть дает нам переменный ток. Слова «постоянный» и «переменный» относятся к величинам напряжения, ЭДС и силы тока. Если в процессе протекания тока все эти величины остаются неизменными, то ток постоянный, если они меняются, то ток переменный.

Характер изменения электрического тока во времени может быть разным в зависимости от устройства, которое создает ток. Кривую, описывающую изменение электрического тока, можно получить при помощи электронно-лучевой трубки. Электронный луч отклоняется полями двух взаимно перпендикулярных плоских конденсаторов. Накладывая на пластины конденсаторов разные напряжения, можно заставить светящееся пятнышко, оставляемое лучом на экране, бродить по всей плоскости экрана.



Рис. 4.1.

Для получения картины переменного тока поступают следующим образом. К одной паре пластин подводят так называемое пилообразное напряжение, кривая которого показана на рис. 4.1. Если электронный луч находится только под его действием, то пятнышко равномерно

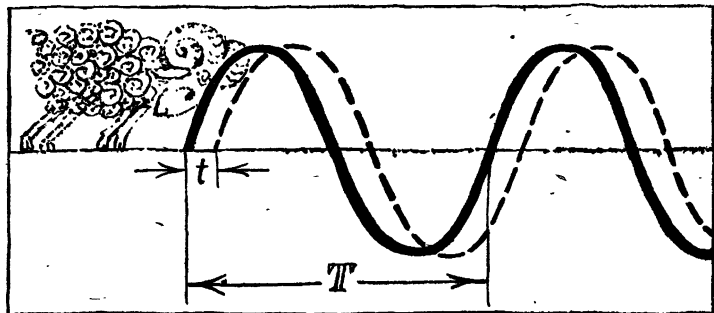


Рис. 4.2.

движется по экрану, а затем скачком возвращается в исходное положение. Положение пятнышка дает сведения о моменте времени. Если на другую пару пластин наложено изучаемое переменное напряжение, то оно «развернется», совершенно таким же образом, как механическое колебание «разворачивается» с помощью простого устройства, показанного в первой книге.

Сказав «колебание», я не оговорился. Большей частью величины, характеризующие переменный ток, колеблются по тому же гармоническому закону синусоиды, которому подчиняются отклонения маятника от равновесия. Чтобы убедиться в этом, достаточно подключить к осциллографу городской переменный ток.

По вертикали могут быть отложены ток или напряжение. Характеристики тока те же, что и параметры механического колебания. Промежуток времени, после которого картина изменений повторяется, носит, как известно, название периода T ; частота тока ν — величина, обратная периоду, — равна обычно для городского тока 50 колебаниям в секунду.

Когда рассматривается одна синусоида, то выбор начала отсчета времени безразличен. Если же две синусоиды накладываются друг на друга так, как это показано на рис. 4.2, то надо указать, на какую долю периода они смещены по фазе. Фазой называется угол $\varphi = 2\pi \frac{t}{T}$. Так что если кривые сдвинуты по отношению друг к другу на четверть периода, то мы говорим, что они смещены по фазе на 90 градусов, если на восьмую часть периода — то значит на 45 градусов по фазе, и т. д.

Когда идет речь о нескольких синусоидах, сдвинутых по фазе, техники говорят о векторах тока или напряжения. Длина вектора соответствует амплитуде синусоиды, а угол между векторами — сдвигу фаз. Многие технические устройства дают нам не простой синусоидальный ток, а такой, кривая которого является суммой нескольких смещенных синусоид.

Покажем, что простой синусоидальный ток возникает в том случае, если проводящая рамка вращается в однородном магнитном поле с постоянной скоростью.

При произвольном направлении рамки по отношению к силовым линиям магнитный поток, проходящий через контур, равен

$$\Phi = \Phi_{\text{макс}} \sin \varphi;$$

φ — угол между плоскостью витка и направлением поля. Этот угол меняется со временем по закону $\varphi = 2\pi t/T$.

Закон электромагнитной индукции позволяет вычислить ЭДС индукции. Запишем выражения магнитных потоков для двух мгновений, отличающихся на очень малый промежуток времени τ :

$$\Phi = \Phi_m \sin \frac{2\pi}{T} t, \quad \Phi = \Phi_m \sin \frac{2\pi}{T} (t + \tau).$$

Разность этих выражений:

$$2\Phi_m \cos \frac{2\pi}{T} \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \sin \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\tau}{2} \right).$$

Так как τ очень мало, то справедливы следующие приближенные равенства:

$$\sin \left(\frac{2\pi}{T} \cdot \frac{\tau}{2} \right) \approx \frac{2\pi}{T} \frac{\tau}{2}, \quad \cos \frac{2\pi}{T} \left(t + \frac{\tau}{2} \right) \approx \cos \frac{2\pi}{T} t.$$

ЭДС индукции равна этой разности, отнесенной ко времени. Значит,

$$\mathcal{E}_{\text{инд}} = \frac{2\pi}{T} \Phi_m \cos \frac{2\pi}{T} t = \frac{2\pi}{T} \Phi_m \sin \left(\frac{2\pi}{T} t - \frac{\pi}{2} \right).$$

Мы доказали, что ЭДС индукции выражается синусоидой, сдвинутой по отношению к синусоиде магнитного потока на 90 градусов. Что касается максимального значения ЭДС индукции — ее амплитуды, то оно пропорционально произведению амплитуды магнитного потока на частоту вращения рамки.

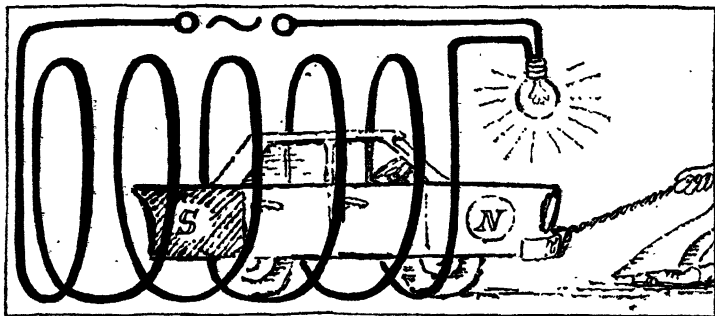


Рис. 4.3.

Закон для силы тока получится, если разделить ЭДС индукции на сопротивление цепи. Но мы сделаем грубую ошибку, если приравняем сопротивление переменному току, которое стоит в знаменателе выражения

$$I_{\text{перем}} = \mathcal{E}_{\text{инд}} / R_{\text{перем}},$$

омическому сопротивлению — той величине, с которой мы имели дело до сих пор: Оказывается, что $R_{\text{перем}}$ определяется не только омическим сопротивлением, но зависит еще от двух параметров цепи: ее индуктивности и включенных в цепь емкостей.

То, что закон Ома усложняется, когда мы переходим от постоянного тока к переменному, показывает следующий простой опыт. На рис. 4.3 изображена цепь тока, проходящего через электрическую лампочку и катушку, в которую можно вставлять железный сердечник. Сначала подключим лампочку к источнику постоянного тока. Будем вдвигать железный сердечник в катушку и выдвигать его. Никакого эффекта! Сопротивление цепи не меняется, значит и сила тока остается неизменной. Но повторим этот же опыт для случая, когда цепь подключена к переменному току. Эффектный результат, не правда ли? Теперь лампочка горит ярко, если сердечник не вставлен в катушку, и тускло, если выдвинули железо в катушку.

Итак, при неизменном внешнем напряжении, при неизменном омическом сопротивлении (зависящем лишь от материала, длины и сечения проводов) сила тока

меняется в зависимости от положения железного сердечника в катушке.

Что это значит?

Мы вспоминаем, что железный сердечник резко увеличивает (в тысячи раз) магнитный поток, проходящий через катушку. В случае переменной ЭДС магнитный поток в катушке все время меняется. Но если без железного сердечника он менялся от нуля до какой-то условной единицы, то при наличии сердечника он будет меняться от нуля до нескольких тысяч единиц.

При изменении магнитного потока силовые линии будут пересекать витки «своей» катушки. В катушке будет возникать ток самоиндукции. Согласно правилу Ленца этот ток будет направлен так, чтобы ослабить эффект, его вызвавший: внешняя ЭДС встречает особую помеху, которой не существовало тогда, когда ток был постоянным. Иными словами, у переменного тока имеется дополнительное сопротивление, обязанное тому, что магнитное поле, пересекая провода своей цепи, создает особую ЭДС, называемую ЭДС самоиндукции, которая ослабляет среднюю силу тока. Это дополнительное сопротивление называется индуктивным.

Опыт говорит (и это обстоятельство, без сомнения, покажется читателю вполне естественным), что магнитный поток, пронизывающий катушку (или, говоря более общо, пронизывающий весь контур тока), пропорционален силе тока: $\Phi = LI$. Что же касается коэффициента пропорциональности L , который называется индуктивностью, то он зависит от геометрии проводящего контура и от того, какие сердечники он охватывает. Как очевидно из формулы, численное значение индуктивности равно магнитному потоку при силе тока в один ампер. Единица измерения L — генри ($1 \text{ Г} = 1 \text{ Ом} \cdot \text{с}$).

Можно теоретически вывести и подтвердить на опыте, что индуктивное сопротивление R_L выражается формулой:

$$R_L = 2\pi\nu L.$$

Если омическое сопротивление (с которым мы знакомы) и емкостное сопротивление (с которым познакомимся ниже) малы, то сила тока в цепи равна:

$$I = \mathcal{E}/R_L.$$

Для того чтобы судить о том, что «мало», а что «велико», прикинем значение индуктивного сопротивления для частоты городского тока и индуктивности 0,1 Г. Получим примерно 30 Ом.

Ну, а что собой представляет катушка с индуктивностью в один генри? Для оценки индуктивности катушек и дросселей (катушек с железными сердечниками) применяется следующая формула, которую мы даем без вывода:

$$L = \mu_0 \mu \frac{n^2}{l} S, \quad \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Дж/(А}^2 \cdot \text{м)};$$

здесь n — число витков, l — длина катушки, S — поперечное сечение. Так что 0,002 генри даст, например, катушка со следующими параметрами: $l=15$ см, $n=1500$, $S=1$ см². Если вставить железный сердечник с $\mu=1000$, то индуктивность будет равна 2 генри.

ЭДС любого происхождения, а значит и ЭДС самоиндукции, производит работу. Эта работа, как нам известно, равна $\mathcal{E}I$. Если ток переменный, то и $\mathcal{E}$, и I в каждое мгновение меняют свои значения. Пусть в момент t их величины равны $\mathcal{E}_1$ и I_1 , а в момент $(t+\tau)$ они равны $\mathcal{E}_2$ и I_2 . Магнитный поток, пересекающий витки катушки с индуктивностью L , равен LI . В момент t он имел значение LI_1 , а в момент $t+\tau$ — значение LI_2 . Чему же равна работа, которая потребовалась для увеличения тока от значения I_1 до I_2 ? ЭДС равна изменению магнитного потока, отнесенному ко времени изменения:

$$\mathcal{E} = L(I_2 - I_1)/\tau.$$

Чтобы получить работу $\mathcal{E}I\tau$, надо умножить это выражение на время и на силу тока. На какую? На среднее значение, т. е. на $(I_1 + I_2)/2$. Приходим к заключению, что работа ЭДС самоиндукции равна:

$$\frac{L}{2} (I_2 + I_1)(I_2 - I_1) = \frac{L}{2} I_2^2 - \frac{L}{2} I_1^2.$$

Этот арифметический результат можно выразить следующим образом: работа ЭДС равняется разности величины $LI^2/2$ в два момента времени. Это означает, что на индуктивном сопротивлении энергия не рассеивается, не переходит в тепло, как это имеет место в цепях с омическим сопротивлением, а переходит «в запас».

Именно поэтому вполне правомерно назвать величину $LI^2/2$ магнитной энергией тока.

Рассмотрим теперь, как скажется на сопротивлении контура переменному току включение конденсатора.

Если в цепь постоянного тока включить конденсатор, то ток не пойдет. Ведь включить конденсатор — это все равно, что разорвать цепь. Но тот же самый конденсатор в цепи переменного тока не обратит ток в нуль.

Нас, разумеется, интересует причина этого различия. Объяснение несложное. После подключения цепи к источнику переменного тока электрический заряд начинает накапливаться на обкладках конденсатора. К одной обкладке подходит положительный заряд, к другой — отрицательный. Положим, что индуктивное и омическое сопротивления малы. Зарядка будет происходить до тех пор, пока напряжение на обкладках конденсатора не станет максимальным и равным ЭДС источника. В это мгновение сила тока равна нулю. Теперь напряжение источника начинает падать, конденсатор «разряжается».

Измеряя с помощью какого-либо прибора силу тока в цепи с конденсатором, мы можем убедиться в том, что сила тока будет разной в зависимости от двух величин. Во-первых, доказывается (и на опыте, и с помощью теоретических рассуждений), что ток уменьшается по мере падения частоты. Значит емкостное сопротивление обратно пропорционально частоте. Результат вполне естественный, ибо чем меньше частота, тем больше переменный ток, так сказать, приближается к току постоянному.

Изменяя геометрические параметры конденсатора, т. е. расстояние между пластинами и площади пластин, мы убедимся в том, что емкостное сопротивление также обратно пропорционально и емкости конденсатора.

Формула емкостного сопротивления имеет такой вид:

$$R_c = \frac{1}{2\pi\nu C}.$$

Конденсатор, емкость которого 30 микрофард, при частоте городского тока дает сопротивление около 100 Ом.

Я не собираюсь рассказывать читателю, как рассчитывается сопротивление сложных цепей тока, со-

ставленных из омических, индуктивных и емкостных сопротивлений. Предупрежу только об одном: общее сопротивление цепи не равно сумме отдельных сопротивлений.

Сила электрического тока и напряжение на отрезке цепи, включающем омическое сопротивление, конденсатор и индуктивную катушку, могут быть обычным способом измерены с помощью осциллографа (электронно-лучевой трубки). И ток, и напряжение мы увидим на экране в виде синусоид. Мы не удивимся, обнаружив, что эти синусоиды сдвинуты друг по отношению к другу на некоторый фазовый угол φ . (То, что так и должно быть, читатель быстро сообразит, вспомнив, что, скажем, в цепи с конденсатором ток равняется нулю, когда напряжение на конденсаторе максимально.)

Значение сдвига фаз φ весьма важно. Ведь мощность тока равняется произведению силы тока на напряжение. Если синусоиды тока и напряжения совпадают, это значение будет максимальным, а если сдвинуты так, как это будет в цепи, обладающей одним емкостным или одним индуктивным сопротивлением, то мощность будет равняться нулю. В этом нетрудно убедиться, нарисовав две синусоиды, сдвинутые на девяносто градусов, перемножив их ординаты и сложив эти произведения за один период. Можно строго доказать, что в общем случае в среднем за период мощность переменного тока равна

$$W = IU \cos \varphi.$$

Увеличение $\cos \varphi$ — задача инженера-электрика.

ТРАНСФОРМАТОРЫ

Вы приобрели холодильник ЗИЛ. Продавец вас предупредил, что холодильник рассчитан на напряжение в сети 220 вольт. А у вас в доме сетевое напряжение 127 вольт. Безвыходное положение? Ничуть. Просто придется сделать дополнительную затрату и приобрести трансформатор.

Трансформатор — очень простое устройство, которое позволяет как повышать, так и понижать напряжение. Он состоит из железного сердечника, на который

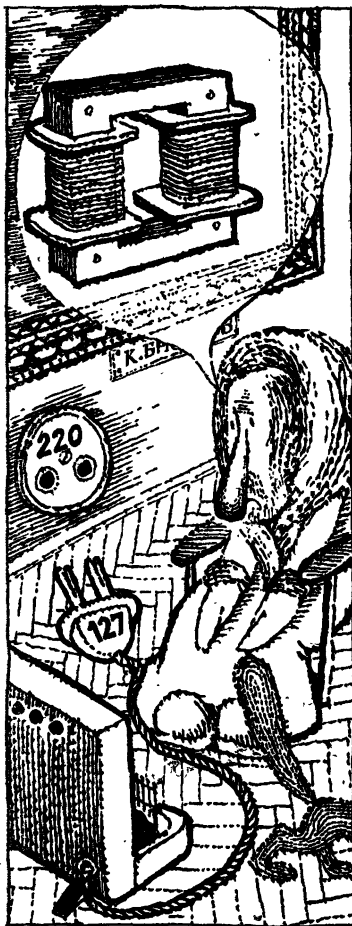


Рис. 4.4.

надеты две обмотки (ка-
тушки). Число витков в ка-
тушках разное.

Подключим к одной из
катушек сетевое напряже-
ние. С помощью вольтмет-
ра мы убедимся в том, что
на концах другой обмотки
появится напряжение, от-
личающееся от сетевого.
Если первичная обмотка
имеет w_1 витков, а вторич-
ная w_2 , то отношение нап-
ряжений будет:

$$\frac{U_1}{U_2} = \frac{w_1}{w_2}.$$

Таким образом, транс-
форматор будет повышать
напряжение, если первич-
ное напряжение подведено
к катушке с меньшим чис-
лом витков, и понижать в
обратном случае.

Почему так получает-
ся? Дело в том, что весь
магнитный поток проходит
практически через желез-
ный сердечник. Значит обе
катушки пронизаны оди-
наковым числом силовых
линий. Трансформатор бу-
дет действовать лишь в
случае, если первичное
напряжение переменное.

Синусоидальное изменение тока в первичной катуш-
ке будет вызывать синусоидальную ЭДС индукции.
во вторичной катушке. Виток первичной и виток
вторичной катушек находятся в одинаковых услови-
ях. ЭДС одного витка первичной катушки равна ЭДС
сети, поделенной на число витков первичной катушки,
 U_1/w_1 , а ЭДС вторичной катушки равна произведению
 U_1/w_1 на число витков w_2 .

В принципе каждый трансформатор может быть использован и как повышающий, и как понижающий — в зависимости от того, к какой катушке подключено первичное напряжение.

В житейской практике часто приходится иметь дело с трансформаторами (рис. 4.4). Кроме тех трансформаторов, которыми мы пользуемся волей-неволей из-за того, что торговые приборы рассчитаны на одно напряжение, а в городской сети используется другое, кроме них приходится иметь дело с бобинами автомобиля. Бобина — это повышающий трансформатор. Для создания искры, поджигающей рабочую смесь, требуется высокое напряжение, которое мы и получаем от аккумулятора автомобиля, предварительно превратив постоянный ток аккумулятора в переменный с помощью прерывателя.

Нетрудно сообразить, что с точностью до потерь энергии, идущей на нагревание трансформатора, при повышении напряжения уменьшается сила тока, и наоборот.

Для сварочных аппаратов требуются понижающие трансформаторы. Для сварки нужны очень сильные токи, и трансформатор сварочного аппарата имеет всего лишь один выходной виток.

Вы, наверное, обращали внимание, что сердечник трансформатора изготовляют из тонких листов стали. Это сделано для того, чтобы не терять энергии при преобразовании напряжения. Как мы говорили выше, в листовом материале вихревые токи будут играть меньшую роль, чем в сплошном.

Дома вы имеете дело с маленькими трансформаторами. Что же касается мощных трансформаторов, то они представляют собой огромные сооружения. В этих случаях сердечник с обмотками помещен в бак, заполненный охлаждающим маслом.

МАШИНЫ, КОТОРЫЕ СОЗДАЮТ ЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ТОК

Машины, превращающие механическое движение в электрический ток, были созданы всего лишь каких-то полтора-два столетия назад.

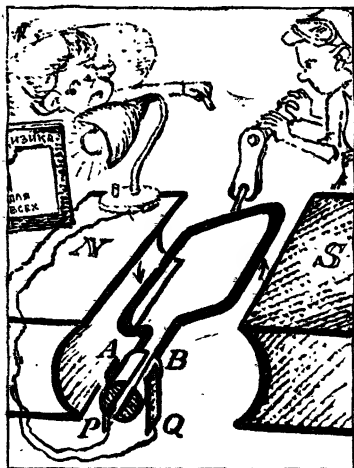


Рис. 4.5.

Первым генератором тока была машина Фарадея, в которой проводочный виток вращался в поле постоянных магнитов. Достаточно быстро пришла в голову (но не Фарадею!) мысль заменить один виток катушкой и таким образом суммировать все ЭДС, создаваемые во всех витках. Лишь в 1851 г. постоянные магниты были заменены электромагнитами, т. е. катушками, надетыми на железный сердечник. Возник термин «возбуждение машины», ибо для того, чтобы машина начала да-

вать ток, нужно было «оживить» электромагнит. Сначала для возбуждения машины в обмотку электромагнита подавали ток от постороннего источника питания.

Следующим этапом явилось открытие принципа самовозбуждения машины, согласно которому не обязательно иметь дополнительный источник питания для возбуждения электромагнитов. Достаточно обмотку возбуждения электромагнитов соединить тем или иным способом с основной обмоткой машины. К концу 80-х годов прошлого столетия электрическая машина приобрела основные черты, сохранившиеся до сегодняшнего дня. Простейшая модель генератора постоянного тока изображена на рис. 4.5. Если вращать рамку в поле постоянных магнитов, в ней будет наводиться синусоидальная ЭДС.

Если пожелать получить из переменного тока постоянный, то придется снабдить машину специальным устройством, которое называется коллектором. Коллектор представляет собой два полукольца *A* и *B*, изолированных друг от друга и надетых на общий цилиндр (рис. 4.5). Цилиндр вращается вместе с рамкой. На полукольца наложены контакты *P* и *Q* (щетки), с помощью которых ток отводится во внешнюю цепь. При каждом полуобороте рамки концы ее переходят с одной щетки

на другую. Поэтому, несмотря на изменение направления тока в самой рамке, ток во внешней цепи своего направления не меняет. Так как вращающаяся часть реальной машины состоит из большого числа рамок — секций, сдвинутых на определенный угол друг относительно друга, а коллектор состоит из соответствующего числа пластин, то на щетках машины получаем практически постоянную ЭДС.

В настоящее время строятся генераторы постоянного тока на мощности от долей киловатта до нескольких тысяч киловатт. Крупные генераторы применяются для электролиза в химической промышленности и цветной металлургии (производство алюминия, цинка). Они рассчитаны на большие токи и относительно низкие напряжения (120—200 В, 1000—20 000 А). Машины постоянного тока используются также для электросварки.

Но генераторы постоянного тока не являются основными производителями электрической энергии. В СССР для производства и распределения электроэнергии принят переменный ток частотой 50 Гц. Генератор переменного тока создается таким, чтобы от него можно было получить одновременно три ЭДС одинаковой частоты, но отличающиеся одна от другой по фазе на угол $2\pi/3$.

Такой трехфазный генератор схематически изображен на рис. 4.6. На рисунке каждая из катушек заменена одним витком. На нашем рисунке провода одного из витков помечены $C_1—C_4$, второго $C_2—C_5$ и третьего $C_3—C_6$. Если ток входит в C_1 , то он выходит в C_4 , и т. д. (Разумеется, в моменты, соответствующие разным расположениям ротора и статора, любой из концов может быть входом или выходом тока.) ЭДС в неподвижных витках обмотки статора наводится в результате пересечения их магнитным полем вращающегося электромагнита — ротора. При вращении ротора с равномерной скоростью в обмотках фаз статора возникают

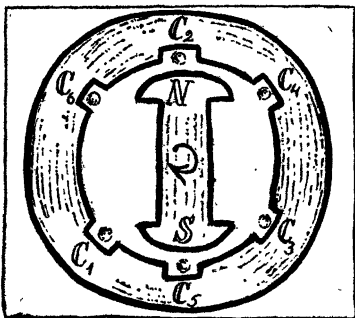
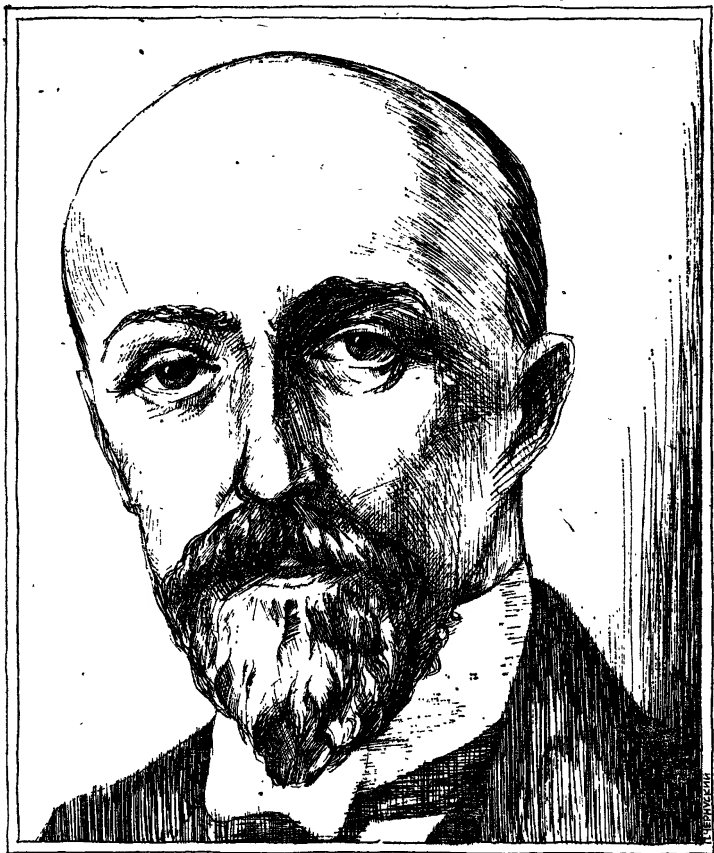


Рис. 4.6.



МИХАИЛ ОСИПОВИЧ ДОЛИВО-ДОБРОВОЛЬСКИЙ (1862—1919) — замечательный русский ученый и инженер; создатель системы трехфазного тока, которая лежит в основе всей современной электротехники. Разработал все без исключения элементы трехфазных цепей переменного тока. В 1888 году построил первый трехфазный генератор переменного тока с вращающимся магнитным полем.

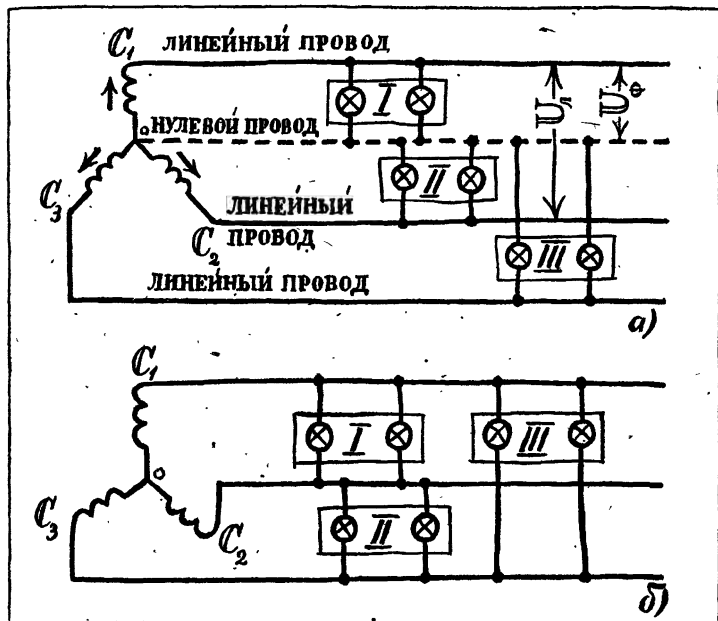


Рис. 4.7.

периодически изменяющиеся ЭДС одинаковой частоты, но отличающиеся друг от друга по фазе на угол 120° вследствие их пространственного смещения.

Три витка катушки могут быть соединены между собой по-разному: в звезду или треугольник. Эти схемы разработаны и внедрены в практику Михаилом Осиповичем Доливо-Добровольским (1862—1919) в начале 90-х годов прошлого столетия. При соединении звездой концы всех обмоток генератора C_4 , C_5 , C_6 соединяют в одну точку, которая называется нулевой или нейтральной. С приемниками энергии генератор соединяют четырьмя проводами: тремя «линейными», идущими от начал обмоток C_1 , C_2 , C_3 , и нулевым или нейтральным проводом, идущим от нулевой точки генератора. Эта система называется четырехпроводной.

Напряжение между нулевой точкой и началом фазы называется фазным. Напряжение между началами обмоток называется линейным. Эти напряжения связаны

$$U_{\text{л}} = \sqrt{3} U_{\text{ф}}.$$

Если нагрузки (*I*, *II*, *III*) всех трех фаз одинаковы, то ток в нулевом проводе равен нулю. В этом случае нулевой провод можно упразднить и перейти к трехпроводной системе. Схемы соединения звездой показаны на рис. 4.7.

Соединение треугольником также допускает трехлинейную проводку. При этом конец каждой обмотки соединен с началом следующей так, что они образуют замкнутый треугольник. Линейные провода присоединены к вершинам треугольника. Здесь линейное напряжение равно фазному, а токи связаны соотношением

$$I_{\text{л}} = \sqrt{3} I_{\text{ф}}.$$

Трехфазные цепи имеют следующие преимущества: более экономичная передача энергии по сравнению с однофазными цепями, возможность получения в одной установке двух напряжений — фазного и линейного.

Описанный генератор переменного тока относится к классу синхронных электрических машин. Такое название носят машины, у которых частота вращения ротора совпадает с частотой вращения магнитного поля статора.

Синхронные генераторы являются основными производителями энергии и имеют несколько конструктивных разновидностей в зависимости от способа приведения во вращение их ротора.

Читатель может задать вопрос: раз применяется название «синхронные машины», значит должны быть и асинхронные? Правильно! Но они используются как двигатели, и мы поговорим о них в следующем разделе. Там же остановимся и на том, почему вращается магнитное поле в трехфазной машине переменного тока.

ЭЛЕКТРОДВИГАТЕЛИ

Больше половины всей вырабатываемой электрической энергии преобразуется с помощью электродвигателей в механическую для различных нужд промышленности, сельского хозяйства, транспорта и быта. Наи-

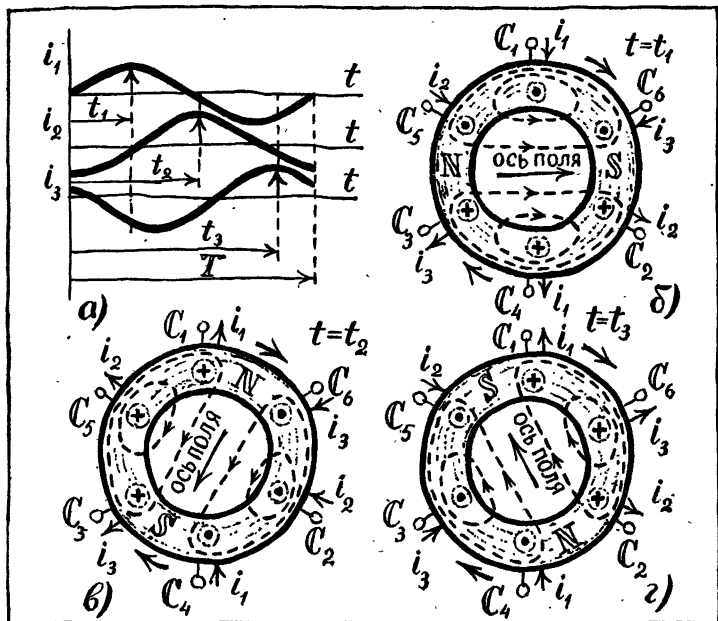


Рис. 4.8.

большее распространение получил простой, надежный, дешевый, неприхотливый в обслуживании асинхронный двигатель, изобретенный в 1889 г. все тем же талантливым инженером Доливо-Добровольским и до сих пор сохранивший свои основные черты. Асинхронный двигатель используется для привода различных станков, насосно-компрессорных, кузнечно-прессовых, подъемно-транспортных и других механизмов.

Прообразом асинхронного двигателя следует считать модель Доменика Араго (1786—1853). В 1824 г. Араго в Парижской Академии наук демонстрировал явление, названное им «магнетизмом вращения». Он показал, что медный диск приходит во вращение, если его поместить в поле вращающегося постоянного магнита. Эту идею блестяще использовал Доливо-Добровольский, сочетая ее с особенностями трехфазной системы токов, позволяющей получить вращение магнитного поля без всяких дополнительных устройств.

Рассмотрим схему на рис. 4.8. Для предельного упрощения на этой схеме представлены три витка (на самом деле, разумеется, машина использует катушки с большим числом витков). Крестик и черная точка показывают вход и выход тока в каждом витке в какой-то определенный момент времени. Эти три витка образуют друг с другом углы в 120 градусов. На рис. 4.8, а показаны фазовые соотношения трех токов i_1 , i_2 , i_3 , протекающих по виткам. Нас интересует результирующее магнитное поле этих трех катушек. На рис. 4.8, б показаны силовые линии результирующего поля для момента t_1 (вход в C_2 , C_3 и C_4), такие же построения выполнены на рис. 4.8, в и г, для моментов времени t_2 и t_3 . Итак, мы видим, что интересующее нас поле вращается (обратите внимание на положения крестиков), вращается в полном смысле этого слова! Ось поля в центре системы располагается по оси того витка (фазы), ток в котором максимален в данный момент времени.

Рисунок, который мы только что обсудили, дает представление о том, как распределена трехфазная обмотка переменного тока в статоре трехфазного асинхронного двигателя. Ротор (рис. 4.9), который увлекается в движение вращающимся магнитным полем, короткозамкнутый, т. е. мы не видим ни начал, ни концов обмотки. Похож ротор на беличью клетку — ряд стержней и замыкающие их кольца. Сравните с машиной постоянного тока. Насколько проще! Подводим к статору переменный трехфазный ток. В машине создается вращающееся магнитное поле. Магнитные силовые линии этого поля пересекают стержни ротора и индуцируют в них токи. В результате взаимодействия стержня, по которому идет ток, и магнитного поля ротор начинает вращаться со скоростью, близкой к скорости поля, но не достигает ее. Так и надо, ибо в противном случае не было бы пересечения стержнями ротора магнитных силовых линий вращающегося поля статора и не было



Рис. 4.9.

бы вращения беличьего колеса. Поэтому такие машины и называются асинхронными. Отставание ротора называется скольжением.

Асинхронные двигатели охватывают большой диапазон мощности — от долей ватта до сотен киловатт. Существуют и более мощные асинхронные двигатели — до 6000 кВт на напряжение 6000 В.

Асинхронные микромашины применяются в устройствах автоматики в качестве исполнительных двигателей для преобразования подводимого к ним электрического сигнала в механическое перемещение вала, а также в качестве тахогенераторов, преобразующих вращение в электрический сигнал.

Электродвигателями могут быть и рассмотренные ранее синхронные машины, и машины постоянного тока. Это следует из очевидного принципа обратимости электрической машины, который заключается в том, что любая электрическая машина может работать и генератором, и двигателем.

Например, в состав Киевского гидроузла на Днепре входит гидроаккумулирующая станция, оборудованная обратимыми агрегатами, которые могут работать и как насосы, и как турбины. При избытке электроэнергии в энергосистеме насосы-турбины поднимают воду в аккумулирующий бассейн. В этом случае входящая в агрегат синхронная машина работает двигателем. При максимальном потреблении электроэнергии агрегат «срабатывает» накопленную воду.

На металлургических заводах, шахтах, холодильниках синхронные двигатели приводят в движение насосы, компрессоры, вентиляторы и другие механизмы, работающие с неизменной скоростью. В автоматических устройствах широко применяются синхронные микродвигатели мощностью от долей ватта до нескольких сотен ватт. Так как частота вращения этих двигателей жестко связана с частотой питающей сети, то они используются там, где требуется поддерживать постоянную скорость вращения, — в электрических часовых механизмах, лентопротяжных механизмах самопишущих приборов и киноустановок, в радиоаппаратуре, программных устройствах, а также в системах синхронной связи, где скорость вращения механизмов управляется изменением частоты питающего напряжения.

По своему принципиальному устройству двигатель постоянного тока ничем не отличается от генератора постоянного тока. Машина имеет неподвижную систему полюсов, обмотка возбуждения которых тем или иным способом соединена с обмоткой якоря (последовательно или параллельно). Машина может возбуждаться и от независимого источника питания. Якорь имеет распределенную в пазах обмотку, которая подключается к источнику постоянного тока. Двигатель, так же как и генератор, имеет коллектор, назначение которого состоит в том, что он «выпрямляет» вращающийся момент, т. е. заставляет машину длительно вращаться в одну сторону.

Двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением особенно пригоден для электрической тяги, для кранов и подъемников. В этих случаях требуется, чтобы при больших нагрузках частота вращения резко падала, а тяга значительно увеличивалась. Такими свойствами и обладает двигатель постоянного тока с последовательным возбуждением.

Первые опыты неавтономной электрической тяги в России были произведены Федором Аполлоновичем Пироцким (1845—1898). Еще в 1876 г. он приспособил для передачи электроэнергии обычный железнодорожный рельсовый путь, а в августе 1880 г. осуществил пуск электрического трамвая на опытной линии в районе Рождественского парка конной железной дороги в Петербурге. В качестве первого трамвайного электровагона был взят двухъярусный вагон конной железной дороги, к кузову которого был подвешен электродвигатель.

Первый трамвай в России — киевский — был открыт для общего пользования в 1892 г. Питание его электродвигателя осуществлялось от верхнего контактного провода. Причем строительная комиссия примирилась с трамваем лишь после того, как в результате подсчетов убедились в техническом преимуществе электрической тяги перед конной в условиях тяжелого профиля киевских улиц, оказавшегося не под силу ни конной, ни паровой тяге.

Первые опыты по «электронавигации» были проведены Борисом Семеновичем Якоби (1801—1874), который в 1838 г. демонстрировал на Неве электрический бот,

вмещавший четырнадцать человек. Он приводился в движение электродвигателем мощностью 550 ватт. Для питания этого двигателя Якоби использовал 320 гальванических батарей. Это было первое в истории применение электродвигателя для целей тяги.

За последние годы в печати стало появляться слово «турбоэлектроход». Смысл этого названия выясняется просто: на таком корабле пар приводит в движение мощные генераторы постоянного тока, а винты размещаются на валах электромоторов. Не лишнее ли это усложнение? Почему бы не поместить винт прямо на вал турбины?

Дело в том, что паровая турбина развивает максимальную мощность лишь при строго определенных оборотах. Мощные турбины делают 3000 оборотов в минуту. При замедлении вращения мощность падает. Если бы винты находились прямо на валу турбин, то корабль, снабженный такой силовой установкой, обладал бы неважными ходовыми качествами. Электрический же двигатель постоянного тока имеет идеальную тяговую характеристику: чем больше силы сопротивления, тем большее тяговое усилие он развивает, причем такой мотор может отдавать большую мощность при малых оборотах, в момент трогания с места.

Таким образом, генератор и двигатель постоянного тока, стоящие между турбиной и винтом турбоэлектрохода, играют роль бесступенчатой автоматической коробки передач, обладающей высоким совершенством. Может показаться, что такая система несколько громоздка, но при больших мощностях современных турбоэлектроходов любая другая была бы столь же объемистой, но менее надежной.

Значительно усовершенствовать силовую установку турбоэлектрохода можно иначе: весьма выгодно заменить громоздкие паровые котлы атомным реактором. При этом достигается огромная экономия на объеме топлива, которое приходится брать в рейс. Мировую известность получил первый советский атомный ледокол «Ленин». Ядерная силовая установка этого турбоэлектрохода обеспечивает автономность плавания более года.

Двигатели постоянного тока установлены на магистральных электровозах, пригородных электропоез-

дах, трамвайных вагонах и троллейбусах. Энергия для их питания поступает от стационарных электрических станций. Для электрической тяги в СССР применяется постоянный ток и однофазный переменный ток промышленной частоты 50 Гц. На тяговых подстанциях трамвая, троллейбуса и метрополитена широкое применение получили кремниевые выпрямители. В случае железнодорожного транспорта выпрямление тока может происходить как на подстанциях, так и на самих электропоездах.

ЭЛЕКТРОМАГНИТНОЕ ПОЛЕ

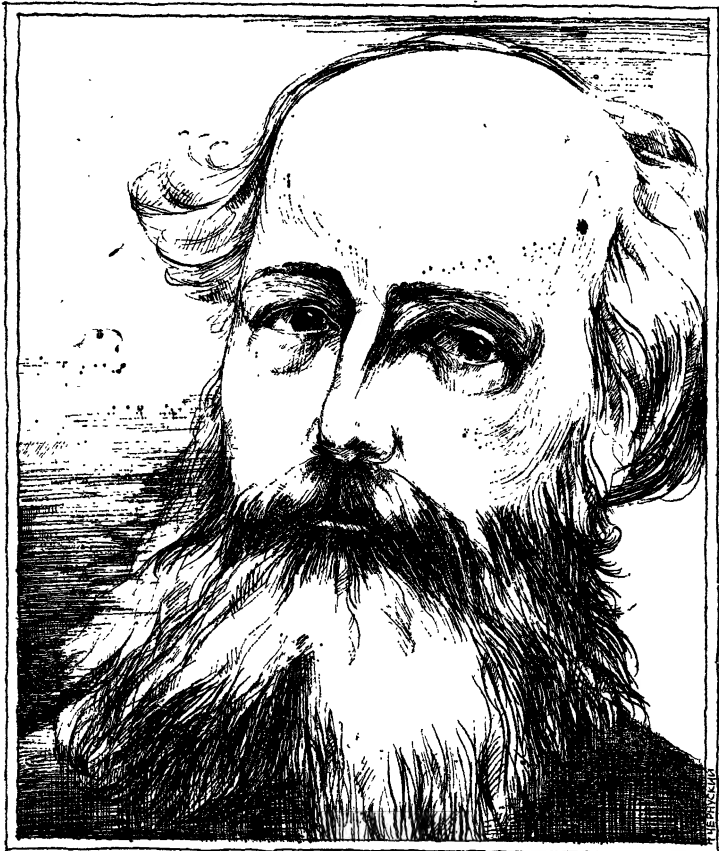
ЗАКОНЫ МАКСВЕЛЛА

К пятидесятым годам прошлого века накопилось много сведений об электричестве и магнетизме. Однако они представлялись разрозненными, иногда противоречивыми, и во всяком случае не укладывались в одну стройную схему.

Но известно уже было не мало. Во-первых, физики знали, что покоящиеся электрические заряды создают электрическое поле, во-вторых, то, что электрические токи создают магнитные поля, и, в-третьих, были опубликованы и получили всеобщее признание результаты опытов Фарадея, доказавшего, что переменное магнитное поле порождает электрический ток.

Несомненно, что в те времена у ряда ученых, и в первую очередь у Фарадея, сложилось убеждение, что какие-то события происходят в пространстве, окружающем электрические токи и заряды. Эта группа исследователей полагала, что электрические и магнитные силы передаются от точки к точке. Были весьма распространены попытки изобразить на бумаге схему, подобную системе связанных шестеренок, которая наглядно показывала бы, в чем состоит механизм передачи электрической энергии. Но некоторые научные деятели проповедовали теорию «дальнодействия»; они полагали, что нет никакого физического процесса передачи электрических и магнитных сил. Понятия поля и силовых линий следует рассматривать, говорили они, лишь как геометрические образы, которым не соответствует никакая бы то ни было реальность.

Как это часто было в истории науки, истина оказалась где-то посередине: несостоятельными оказались



ДЖЕМС КЛАРК МАКСВЕЛЛ (1831—1879) — знаменитый английский ученый, основатель теоретической электродинамики. Уравнения Максвелла описывают поведение электромагнитных волн и электромагнитного поля вне зависимости от его происхождения. Максвелл является создателем электромагнитной теории света. Из его уравнений автоматически следовало значение скорости распространения света. Из теории Максвелла вытекали связь между электрической проницаемостью и показателем преломления, ортогональность электрического и магнитного векторов в волне, наличие светового давления.

Велик вклад Максвелла и в кинетическую теорию газов. Ему принадлежит вывод распределения молекул газа по скоростям.

попытки сведения электромагнитных явлений к движениям особого вида материи — «эфира», но неправыми оказались и те исследователи, которые полагали, что электромагнитные взаимодействия передаются от одного заряда или тока к другим мгновенно.

Английский ученый Джеймс Кларк Максвелл (1831 — 1879) опубликовал свою работу «О фарадеевских силовых линиях», имея за плечами 26 лет. По сути дела уже эта работа содержала в себе открытые им законы. Но еще несколько лет понадобилось ему для того, чтобы, отбросив в сторону механистические представления, сформулировать законы электромагнитного поля в такой форме, которая не нуждается в наивной графической иллюстрации.

Сам Максвелл сказал по этому поводу такую фразу: «На благо людей с различным складом ума научная правда должна представляться в различной форме и должна считаться равно научной, будет ли она представлена в ясной форме и живых красках физической иллюстрации или в простоте и бледности символического выражения».

Законы Максвелла принадлежат к фундаментальным общим законам природы. Эти законы не выводятся путем логических рассуждений и математических расчетов. Общие законы природы являются обобщением нашего знания. Законы природы открывают, находят... Для историка науки и для психолога представляет большой интерес проследить путь догадок и творческих озарений, которые приводят гениев к открытию законов природы. Но это большая тема для специальной книги. Нам же с читателем не остается ничего другого, как рассмотреть некоторую схему последовательных допущений, которые приводят к законам Максвелла.

Что было известно Максвеллу, когда он поставил перед собой задачу кратко выразить в символической форме законы, управляющие поведением электрических и магнитных полей?

Прежде всего он знал, что любую точку пространства вблизи электрического заряда можно охарактеризовать вектором электрической силы (напряженности), а любую точку вблизи электрического тока — вектором магнитной силы.

Но являются ли неподвижные заряды единственными

источниками электрического поля? Являются ли электрические токи единственными источниками магнитного поля?

На эти два вопроса Максвелл дает отрицательный ответ и идет в своем поиске законов электромагнитного поля, следующим путем догадок.

Фарадей показал, что в проволочном контуре, который пронизывается переменным потоком магнитных силовых линий, возникает электрический ток. Но ведь ток создается тогда, когда на электрические заряды действует электрическая сила. Раз так, то можно закон Фарадея выразить и следующей фразой: в проволочном контуре, через который проходит переменный магнитный поток, возникает электрическое поле.

Но разве существенно то, что магнитный поток охватывается проволочным контуром? Не все ли равно электрическому полю, где возникать: в металлическом проводе или в пустом пространстве? Допустим, что все равно. И тогда справедливо следующее утверждение: около меняющегося потока магнитных силовых линий возникает замкнутая электрическая силовая линия.

Два первых закона Максвелла, касающиеся электрического поля, сформулированы. Мы утверждаем, что электрическое поле создается двумя путями: электрическими зарядами (и в этом случае силовые линии начинаются в положительных и кончаются в отрицательных зарядах) и переменным магнитным полем (в этом случае электрическая силовая линия замкнута и охватывает меняющийся магнитный поток).

Теперь мы переходим к поиску законов, касающихся магнитного поля. Магнитное поле создается токами — это Максвеллу известно. Постоянный ток является источником постоянного магнитного поля, а переменный ток образует переменное магнитное поле. Но ведь переменный ток создается в проводе переменным электрическим полем. А что, если провода нет, а есть переменное электрическое поле, существующее в пустоте? Разве не логично допустить, что около переменного потока электрических силовых линий возникает замкнутая магнитная силовая линия? Картина весьма привлекательна своей симметрией: переменный магнитный поток порождает электрическое поле, а переменный электрический поток — поле магнитное.

Итак, к двум законам, касающимся электрического поля, добавляются еще два, которые командуют поведением магнитного поля. Магнитное поле не имеет источников (нет магнитных зарядов) — третий закон, магнитное поле создается электрическими токами и переменным электрическим полем — четвертый закон.

Четыре закона Максвелла могут быть исключительно изящно записаны в виде математических уравнений. Жалко, что я не могу ознакомить читателя со смыслом этой записи. Нужны серьезные знания математики (рис. 5.1).

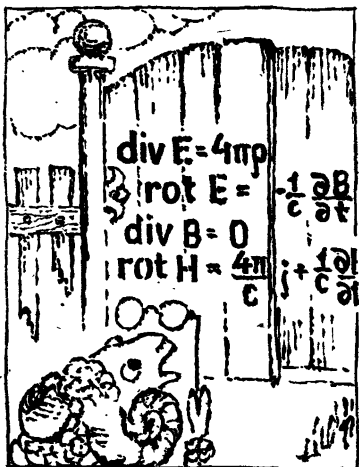


Рис. 5.1.

Законы Максвелла указывают нам на то, что не может существовать переменное магнитное поле без электрического и переменное электрическое — без магнитного. Вот по этой причине два прилагательных не разделяют запятой. Электромагнитное поле — это единая сущность.

Отдалившись от зарядов, являющихся источниками электромагнитного поля, мы имеем дело с электромагнитной материей, так сказать, в чистом виде. Не обязательно рассматривать пучки силовых линий. Законы Максвелла могут быть записаны в такой форме, которая применима к точке пространства. Тогда они звучат особенно просто: в точке, в которой меняется во времени электрический вектор, существует и также меняется во времени вектор магнитного поля.

А не есть ли все сказанное чистая фантазия, спросит читатель. Ведь измерение в точке величин быстро меняющихся векторов электрического и магнитного полей — практически не осуществимая задача.

Справедливо! Но о величии законов природы судят по вытекающим из них следствиям. Следствий этих не перечесать. Я нисколько не преувеличу, если скажу,

что вся электротехника и радиотехника содержатся в законах Максвелла.

Но об одном важнейшем выводе, вытекающем из уравнений Максвелла, рассказать необходимо. Безупречно строгими вычислениями можно показать, что должно существовать явление электромагнитного излучения.

Пусть в некотором ограниченном участке пространства имеются заряды и токи. В этой системе могут происходить разнообразные энергетические превращения. Механические или химические источники порождают электрические токи, токи в свою очередь могут приводить в движение механизмы и создавать тепло, выделяющееся в проводках. Подсчитаем доходы и убытки. Они не сойдутся! Расчет показывает, что какая-то доля энергии из нашей системы ушла в пространство.

Может ли теория сказать что-либо об этой «излученной» энергии? Оказывается, может. Решение уравнения имеет сложный вид вблизи источника, а вот на расстояниях, существенно превышающих размеры «излучающей» системы, картина становится весьма четкой, а самое главное — проверяемой на опыте.

На больших расстояниях электромагнитное излучение — так мы назовем тот энергетический дефицит, который создается в системе движущихся зарядов, — можно в каждой точке пространства характеризовать направлением распространения. В этом направлении электромагнитная энергия перемещается со скоростью около 300 000 км/с. Эта величина следует из теории!

Второй вывод теории: электрический и магнитный векторы перпендикулярны направлению распространения волны и перпендикулярны друг другу. И, в-третьих, интенсивность электромагнитного излучения (энергия, приходящаяся на единицу площади) падает обратно пропорционально квадрату расстояния.

Поскольку было известно, что свет распространяется как раз со скоростью 300 000 км/с, вычисленной для электромагнитного излучения, и имелись достаточно исчерпывающие сведения о поляризации света, которые заставляли думать, что световая энергия обладает некими «поперечными» свойствами, то Максвелл приходит к заключению: свет является видом электромагнитного излучения.

Лет через десять после кончины Максвелла, в конце восьмидесятых годов, замечательный немецкий физик Генрих Герц (1857—1894) подтвердил на опытах все выводы теории Максвелла. После этих опытов законы Максвелла утвердились на веки вечные в роли одного из считанных по пальцам руки краеугольных камней, на которых покоится здание современного естествознания.

МЕХАНИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ ИЗЛУЧЕНИЯ

Механические модели противопоставляются математическим. Механические модели можно осуществить при помощи шариков, пружинок, струн, резиновых шнуров и т. д. Механическая модель помогает сделать явление «зримым». Построив механическую модель и продемонстрировав ее действие, мы помогаем человеку понять явление, говоря: вот такая-то величина ведет себя наподобие вот такого-то смещения. Далеко не всякой математической модели можно сопоставить механическую.

Прежде чем говорить об электромагнитном излучении, факт которого устанавливается бесчисленным количеством опытов и следует с железной логикой из уравнений Максвелла, нам нужно побеседовать о возможных механических моделях излучения.

Таких моделей две: корпускулярная и волновая. Можно изготовить игрушку, которая будет «излучать» во все стороны потоки маленьких частиц — горошинок, маковых зернышек. Это и есть корпускулярная модель, ибо слово «корпускула» значит частица.

Летающая с какой-то скоростью и обладающая некоторой массой частица должна вести себя по законам механики. Частицы способны соударяться, меняя направление своего движения, но обязательно так, чтобы соударение подчинялось законам сохранения энергии и импульса. Какие-то тела могут оказаться непроницаемыми для частиц, и тогда частицы должны от них отражаться по закону: угол падения равен углу отражения. Частицы могут поглощаться средой. Если в одной среде частицам легче двигаться, чем в другой, то не трудно объяснить явление преломления. Проходя

через отверстие в непрозрачном экране, поток частиц, исходящих из точечного источника, должен путешествовать внутри конуса. Правда, возможно незначительное рассеяние, так как небольшая доля частиц может отразиться от краев отверстия. Но, конечно, эти «отражения» могут быть лишь хаотичными и не дадут какого-либо закономерного рисунка, выходящего за пределы геометрической тени.

Волновую модель демонстрируют обычно с помощью водяной ванны. Нетрудно заставить периодически колебаться воду в какой-либо точке. От этой точки, как от камня, брошенного в воду, пойдут круги. Волнообразная поверхность воды видна глазом. Энергия будет распространяться во все стороны, и далеко лежащая щепка придет в колебание с частотой точки, к которой мы подводим энергию.

Звуковые колебания несколько труднее сделать зримыми. Но можно поставить совершенно убедительные эксперименты, которые покажут, что распространение звука — это передача от точки к точке механических смещений среды.

Целый ряд явлений одинаково хорошо объясняются как волновой, так и корпускулярной моделью. Однако обе модели будут одинаково пригодны лишь при дополнительном условии: волна ведет себя так же, как поток частиц, если препятствия и отверстия, которые она встречает на своем пути, много меньше длины волны.

Как мы без труда вычислим по основной формуле, нужной для описания волновой модели, $c = \nu \lambda$, средней частоте человеческого голоса 1000 Гц соответствует длина волны 30 см. Такая волна будет загигать за угол, если ей придется пройти через метровые отверстия. Но если отверстие имеет размеры порядка сантиметра, то можно говорить о звуковом луче, который проходит сквозь отверстие лишь в том случае, если прямая линия, соединяющая источник и приемник звука, не натывается на препятствие.

Положим, идет радиопередача в комнате с открытыми высоко расположенными окнами. Человек, который сидит на скамейке под окном, может расслышать, о чем идет речь. Если же окна плотно закрыты, а стены толстые, то звук будет проходить лишь через замочную скважину двери. Теперь даже самый чувствительный

приемник примет сигнал, только если источник звука, отверстие в двери и приемник попали на прямую линию. Звуковая энергия распространяется в этом случае, как поток частиц.

Нетрудно показать и рассуждениями, и опытами в водяной ванне, что закон отражения от стенок, шероховатости которых меньше длины волны, соблюдается и для волновой модели.

Как отражает звук или любую другую волну плоская гладкая поверхность, читателю превосходно известно. Интересные проблемы возникают в тех случаях, когда отражающая поверхность имеет изогнутую форму.

Вот одна из таких задач. Какой должна быть поверхность для того, чтобы собрать волну, вышедшую из точечного источника, снова в одной точке? Форма отражающей поверхности должна быть такой, чтобы лучи, падающие на нее из одной точки под разными углами, отражались бы снова в одну точку. Что же это за поверхность?

Напомним читателю свойства замечательной кривой, которая называется эллипсом. Расстояние от одного фокуса эллипса до какой-нибудь точки кривой плюс расстояние от другого фокуса до этой же точки одно и то же для всех точек эллипса. Представьте

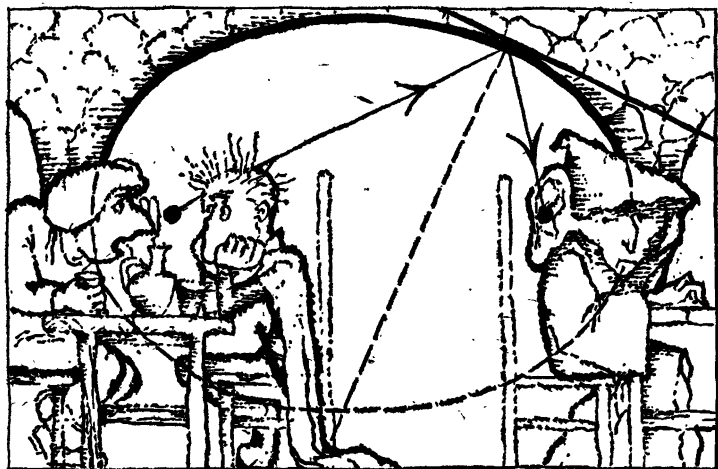


Рис. 5.2.

себе, что эллипс вращается вокруг главного диаметра. Вращающаяся кривая опишет поверхность, которая называется эллипсоидальной. (Форма эллипсоида напоминает яйцо.) Эллипс обладает следующим свойством. Если провести угол, который опирается на одну из точек и стороны которого проходят через фокусы эллипса, то биссектриса этого угла будет нормалью к эллипсу. Значит, если волна или поток корпускул выйдут из одного фокуса эллипса, то, отразившись от его поверхности, они придут в другой.

Для звуковых волн стенки потолка — гладкие. И если потолок сводчатый, то в помещении можно наблюдать особый случай отражения звука: поскольку свод по форме близок к эллипсоидальной поверхности, то звук, вышедший из одного ее фокуса, придет в другой фокус. Это свойство сводчатых поверхностей знали еще в древности. В средние века, во времена инквизиции, им пользовались для подслушивания разговоров. Двое людей, тихим голосом поведывающие друг другу свои мысли, и не подозревали, что их подслушивает дремлющий монах, который сидит в другом углу кабачка (рис. 5.2).

И корпускулярная, и волновая модели одинаково пригодны объяснить это явление. Но явления такого типа, как соударения бильiardных шаров, волновая модель объяснить не в состоянии.

С другой стороны, имеется несколько важнейших фактов, с которыми никак не сможет справиться корпускулярная модель.

Прежде всего это интерференция, т. е. сложение, при котором сумма может оказаться меньше слагаемых, а то и вовсе равной нулю. Если две волны приходят в одну точку и складываются, то кардинальную роль играет разность их фаз в этой точке. Если горб одной волны приходится на горб другой волны, то волны сложатся. Но если горб одной волны придется на впадину другой и если при этом амплитуды волн одинаковы, то сложение приведет ... к нулю: волны, пришедшие в одну точку, погасят друг друга. При наложении одного волнового поля на другое в одних местах произойдет их арифметическое сложение, а в других вычитание. В этом и состоит явление интерференции. Вот первое явление, которое абсолютно невозможно

трактовать на языке потоков частиц. Если излучение ведет себя как поток горошинок, то наложившиеся поля должны были бы всегда и везде усиливать друг друга.

Второе важное явление — это дифракция, т. е. огибание препятствий. Поток частиц не может себя так вести, а волна должна поступить именно таким образом. В школе явление дифракции демонстрируют, возбуждая волны в ванночке, заполненной водой. Ставят на пути волны перегородку с отверстием, и загибание за угол становится видным невооруженному глазу. Причина такого поведения совершенно естественна. Ведь в плоскости отверстия частицы воды пришли в состояние колебания. Каждая точка, лежащая в плоскости отверстия, создает волну, на тех же правах, что и первичный источник излучения. Ничто не мешает этой вторичной волне «завернуть за угол».

Явления интерференции и дифракции демонстрируются без труда, если соблюдено условие, о котором уже было сказано: длина волны должна быть больше или по крайней мере соизмерима с препятствиями или отверстиями. Мы уточним это условие и поговорим подробнее о дифракции и интерференции в следующей книге.

А сейчас остановимся на изменении частоты волны, воспринимаемой наблюдателем при движении источника излучения. То, что такое явление есть необходимое следствие волновой модели, было показано Христианом Допплером (1803—1853) еще на заре теоретической физики.

Выведем формулу Допплера, которая пригодится нам в дальнейшем. Для образности положим, что автомашина приближается к движущемуся оркестру. Число сгущений воздуха, доходящих за единицу времени до уха шофера, будет больше, чем если бы машина стояла на месте, в отношении $(c+u)/u$, где c — скорость распространения волны, а u — относительная скорость источника и приемника волны. Следовательно,

$$v' = v \left(1 + \frac{u}{c} \right).$$

Значит, воспринимаемая частота v' растет при сближении машины и оркестра (тон звука выше, $u > 0$) и падает при удалении (тон звука ниже, $u < 0$). Забегая

вперед, мы можем сказать, что для световой волны этот вывод звучит так: при удалении источника происходит «красное смещение». Важность этого вывода читатель оценит тогда, когда мы поведем речь о наблюдениях спектров далеких звезд.

С давних времен и вплоть до двадцатых годов нашего века мыслители зачастую спорили о том, имеет ли та или иная передача энергии волновую или корпускулярную природу. Опыт показал, что любое излучение имеет два аспекта. И только сочетание этих двух аспектов правильно отображает действительность. Этот факт теория возвела в ранг основного закона природы. Волновая механика, квантовая механика, квантовая физика — это эквивалентные названия современной теории поведения полей и частиц.

ДВА АСПЕКТА ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ПОЛЯ

Электромагнитное излучение в некоторых явлениях ведет себя наподобие волны, а в иных — как поток частиц.

Законы Максвелла обладают в этом смысле «дефектом». Они обрисовывают нам лишь волновой аспект электромагнитного излучения.

В полном согласии с опытом, решение уравнений Максвелла приводит к заключению, что всегда возможно мыслить электромагнитное излучение как сумму волн разных длин и интенсивностей. Если излучающая система представляет собой электрический ток строго фиксированной частоты, то излучение будет «монохроматической» (одноцветной) волной.

Электромагнитная волна изображена на рис. 5.3. Чтобы представить себе изменения, которые происходят в пространстве при распространении электромагнитной энергии, надо «потянуть» наше изображение, как жесткое целое, в направлении оси абсцисс.

Эта картинка есть результат решения уравнений Максвелла. Она и позволяет нам говорить об электромагнитных волнах. Однако, пользуясь этим термином и прибегая к аналогии электромагнитной волны и волны, распространяющейся в воде от брошенного камня, надо действовать с превеликой осторожностью.

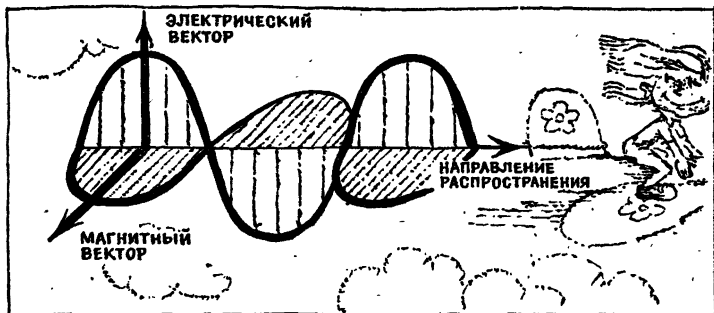


Рис. 5.3.

Наглядные картинки легко могут ввести в заблуждение. Волна на воде является лишь моделью электромагнитной волны. Это значит, что лишь в некоторых отношениях электромагнитные волны и волны на воде ведут себя одинаково.

Но ведь рисунок 5.3, на котором изображена электромагнитная волна, как две капли воды похож на морскую волну, которая то поднимает вверх, то опускает вниз брошенную в море щепку?.. Да ничего подобного! Вдумайтесь в сущность рисунка. По вертикальной оси отложен вектор электрического поля, а вовсе не пространственное смещение!

Каждая точка на горизонтальной оси показывает, что если бы в точку поместить электрический заряд, то на него действовала бы сила, которая изображена величиной ординаты. При путешествии электромагнитной волны, собственно говоря, ничего со своих мест не сдвигается. А провести опыт, который наглядно продемонстрировал бы вам, как в той или иной точке меняется значение электромагнитной волны, практически совершенно невозможно даже для очень медленных колебаний.

Так что представления об электромагнитной волне носят теоретический характер. Мы уверенно говорим о существовании электромагнитной волны по той причине, что слушаем радио. Мы несколько не сомневаемся, что электромагнитная волна обладает определенной частотой, потому что для приема той или иной станции надо настроить приемник на определенную

частоту. Мы уверены, что понятие длины применимо к электромагнитной волне, не только по той причине, что мы можем измерить скорость волны и вычислить длину при помощи уравнения $c = v\lambda$, которое связывает частоту, длину волны и скорость ее распространения, но также и потому, что мы можем судить о длине электромагнитной волны, изучая явления дифракции, т. е. огибания препятствий, причём принципы этого измерения те же, что и для волн, распространяющихся на воде.

Предупредить читателя не стремиться к тому, чтобы представить себе электромагнитную волну наглядно, совершенно необходимо, ибо, как было сказано в начале параграфа, электромагнитное излучение «похоже» не только на волну, оно в ряде случаев «напоминает» нам поведение потока частиц. Представить себе нечто, похожее одновременно и на поток частиц, и на волну, — вот это уже совершенно невозможно. Речь идет о физических процессах, которые не могут быть изображены мелом на чертежной доске. Это, конечно, не означает, что мы не можем исчерпывающим образом познать электромагнитное поле. Надо только помнить, что наглядные картинки являются лишь учебным пособием, способом для лучшего запоминания знаков. Но не забывать, что волновая картина является лишь моделью электромагнитного излучения. Не более того! Там, где это годится, мы этой моделью пользуемся, но нас несколько не должно удивлять, что в иных случаях эта модель введет нас лишь в заблуждение.

Так же точно и корпускулярный аспект электромагнитного поля наблюдается не всегда. Было бы, конечно, легче жить, если бы условия, в которых эти два аспекта проявляются, были бы взаимно исключаящими. Но нет. Дело обстоит не так. Даже описывая один и тот же эксперимент, зачастую приходится говорить одновременно на двух языках.

Все же более просто (а впрочем, лучше сказать — раньше было проще) наблюдать корпускулярный аспект электромагнитного излучения в случае коротких волн. В ионизационной камере и других аналогичных приборах можно наблюдать столкновение частицы электромагнитного излучения с электроном или иной «честной» частицей. Столкновение может происходить

так, как встреча бильярдных шаров. Понять такое поведение, привлекая на помощь волновой аспект электромагнитного излучения, совершенно невозможно.

Рассмотрим возникновение электромагнитного излучения на языке теории Максвелла. Система зарядов колеблется с какой-то частотой. В такт этим колебаниям меняется электромагнитное поле. Частота колебаний поля ν , поделенная на скорость распространения 300 000 км/с, дает нам значение длины волны излучения.

Если перейти на язык квантовой физики, то это же явление будет описано следующим образом. Имеется система зарядов, для которой характерна система дискретных уровней энергии. По какой-то причине эта система пришла в возбужденное состояние, но в этом состоянии прожила недолго и перешла на более низкий уровень. Выделившаяся при этом энергия $E_2 - E_1 = h\nu$ излучается в виде частицы, носящей название фотона. С постоянной h мы уже знакомы (стр. 100). Это та же постоянная Планка.

Если уровни энергии системы расположены очень близко друг к другу, то фотон обладает малой энергией, малой частотой и, следовательно, большой длиной волны. В этом случае квантовый корпускулярный аспект электромагнитного поля мало заметен и обнаруживает себя лишь в явлениях поглощения, связанных с очень малыми изменениями энергии электронов или атомных ядер (магнитный резонанс). Столкновений фотона с частицами, подобных удару бильярдных шаров, в случае волн большой длины наблюдать не удастся.

Расскажем вкратце о тех фактах, которые, так сказать, приперли физиков к стене и заставили согласиться с тем, что волновая теория (в которую уже много десятков лет верили, как в полную и исчерпывающую истину) не в состоянии объяснить *все* факты, касающиеся электромагнитных полей. Фактов таких очень много, но пока что мы ограничимся явлением, которое носит название фотоэлектрического эффекта. После того как читатель согласится с тем, что без корпускулярного аспекта картина электромагнитного поля не может быть создана, мы обратимся к замечательным опытам Герца, из которых выросла вся радиотехника,

и покажем, каким образом волновой аспект электромагнитного поля был обрисован не только в общих чертах, но и в деталях.

ФОТОЭЛЕКТРИЧЕСКИЙ ЭФФЕКТ

Звучное и красивое название «фотон» появилось несколько позже, чем произведение постоянной Планка h на частоту электромагнитной волны ν . Как мы сказали выше, переход системы из одного энергетического состояния в другое сопровождается поглощением или излучением порции энергии $h\nu$. К такому заключению на рубеже нашего и предыдущего столетий пришел замечательный немецкий физик Макс Планк. Он показал, что только таким способом удастся истолковать излучение раскаленных тел. Рассуждения относились к электромагнитным волнам, получаемым нерадиотехническим способом. В то время еще не было доказано и не было всеми признано, что то, что справедливо для света, верно и для радиоволн, хотя законы Максвелла указывали со всей определенностью, что между радиоволнами и другими электромагнитными волнами, в том числе светом, нет никакого принци-

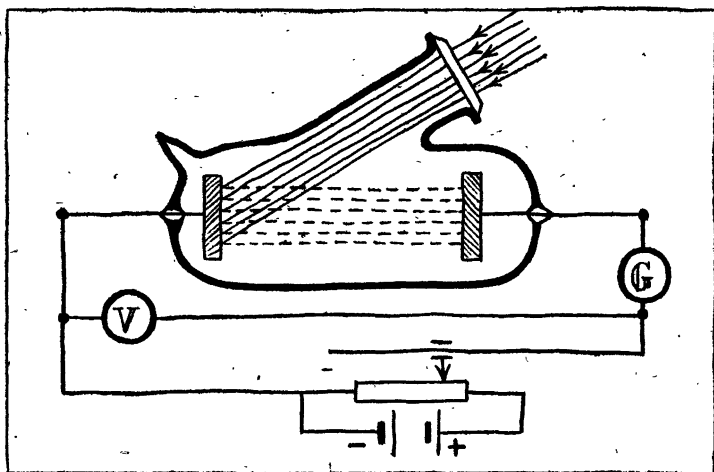


Рис. 5.4.

ального различия. Понимание и экспериментальные доказательства универсальной справедливости утверждения Планка пришли позже.

В работе Планка шла речь об излучении света порциями, т. е. квантами. Однако в ней не отмечалось, что квантовый характер излучения делает неизбежным введение в рассмотрение корпускулярного аспекта электромагнитного поля. Да, говорилось в то время, поле излучается порциями, но порция есть некоторый цуг волн.

Важнейший шаг, т. е. признание того, что излученная порция энергии $h\nu$ есть энергия частицы, которую сразу окрестили фотоном, был сделан Эйнштейном, показавшим, что только с помощью корпускулярных представлений можно объяснить явление фотоэлектрического эффекта, т. е. выбивание электронов из твердых тел под действием света.

На рис. 5.4 изображена схема, с помощью которой в конце прошлого века началось детальное изучение явления, названного внешним фотоэффектом.

Впервые на то, что свет как-то влияет на электроды вакуумной трубки, указал, видимо, Генрих Герц в 1888 г. Работая одновременно, Сванте Аррениус (1859—1927), Вильгельм Гальвакс (1859—1922), Аугусто Риги (1850—1920) и прекрасный русский физик Александр Григорьевич Столетов (1839—1896) показали, что освещение катода приводит к возникновению тока. Если к показанной на рисунке трубке (ее называют фотоэлементом) напряжение не приложено, то лишь незначительная часть электронов, выбитых светом из катода, доберется до противоположного электрода. Слабое подгоняющее напряжение (минус на фотокатоде) увеличит ток. В конце концов ток достигнет насыщения: все электроны (число которых при данной температуре вполне определено) достигают анода.

Сила фототока строго пропорциональна интенсивности света. Интенсивность света однозначно определяется числом фотонов. Сразу же приходит в голову мысль (строгие расчеты и опыты подтверждают ее), что один фотон выбивает из вещества один электрон.

Энергия фотона идет на то, чтобы вырвать электрон из металла и придать ему скорость. Именно так и понимается уравнение, которое впервые было записано

Альбертом Эйнштейном (1905). Вот это уравнение:

$$h\nu = \frac{mv^2}{2} + A,$$

где A — работа выхода (см. стр. 74).

Энергия фотона должна быть во всяком случае больше работы выхода электронов из металла. А это значит, что для фотона каждой энергии (а энергия однозначно связана с «цветностью») существует своя граница фотоэффекта.

Фотоэлементы, использующие описанный нами внешний фотоэффект, широко распространены. Они употребляются в фотореле, телевидении, звуковом кино.

Чувствительность фотоэлементов можно повысить, заполняя их газом. В этом случае ток усиливается разламыванием электронами нейтральных молекул газа и приобщением их к фототоку.

Фотоэлектрический эффект, правда не тот, который мы описали, а так называемый внутренний фотоэффект, происходящий в полупроводниках на границе p — n -слоя, играет исключительно важную роль в современной технике. Но, чтобы не перебивать изложения, мы отложим разговор о прикладном значении фотоэффекта до следующей книги. Сейчас рассмотрение этого явления нам понадобилось лишь для того, чтобы показать неизбежность признания корпускулярных свойств у электромагнитного поля.

Долгое время фотоны были неприкаемыми пасынками физики. Ведь доказательство существования фотона и исследование законов фотоэффекта на 20—30 лет опередило становление квантовой физики. Только в конце двадцатых годов, когда эти законы были установлены, стало понятным, почему одна и та же числовая константа — постоянная Планка h — появляется в формуле энергии фотона и в формуле, о которой шла речь на странице 100, определяющей возможные значения момента импульса частиц.

Значение этой постоянной определяется из самых различных опытов. Фотоэлектрический эффект, так называемый эффект Комптона (изменение длины волны рентгеновских лучей при рассеянии), возникновение излучения при аннигиляции частиц — все эти и многие другие опыты приводят к одному и тому же числу.

ОПЫТЫ ГЕРЦА

Теперь обратимся к тому, как были доказаны гипотезы, касающиеся волнового аспекта электромагнитного поля.

Из законов Максвелла логика и математика вытягивают следствия. Эти следствия могли оказаться верными, а могли бы и не подтвердиться на опыте. Физическая теория входит в науку только после ее экспериментальной проверки. Путь становления теории электромагнитного поля: от разрозненных фактов к общим гипотезам, от гипотез к следствиям и последний этап — эксперимент, который говорит свое решающее слово, — единственная правильная дорога естествоиспытателя. На примере законов электромагнитного поля эта дорога прослеживается особенно четко.

Поэтому мы и остановимся детально на опытах Герца, которые и сегодня помогают преподавателю показать школьнику или студенту, как создается уверенность ученого в справедливости законов природы.

Историю придется начать с 1853 г., когда знаменитый английский физик Кельвин математически доказал, что при разряде конденсатора через катушку самоиндукции в цепи возникают электрические колебания: заряд на обкладках кон-

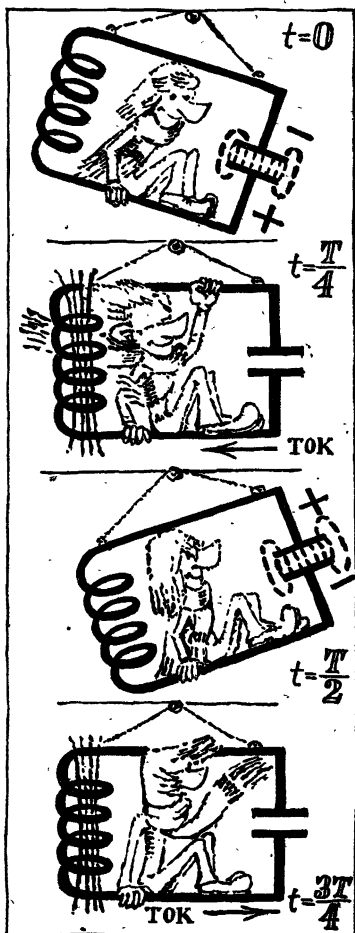


Рис. 5.5.

денсатора, напряжение на любом участке цепи, сила тока — все эти величины будут меняться по закону гармонического колебания. Если считать, что сопротивление в цепи ничтожное, то эти колебания будут продолжаться вечно.

На рис. 5.5 изображена картинка, поясняющая явления, которые происходят в этом так называемом колебательном контуре. В начальный момент времени конденсатор заряжен. Как только цепь будет замкнута, по ней потечет ток. Через четверть периода конденсатор будет полностью разряжен. Его энергия $\frac{1}{2}q^2/C$ перейдет в энергию магнитного поля катушки. Сила тока в этот момент будет максимальна. Ток не прекратится, а будет продолжать идти в том же направлении, постепенно уменьшая свою силу. Через полпериода сила тока обратится в нуль, магнитная энергия $\frac{1}{2}LI^2$ пропадет, а конденсатор полностью зарядится и возвратит свою энергию. Однако напряжение сменит знак. Далее процесс повторится, так сказать, в обратном направлении. Через некое время T (период колебания) все вернется к исходному состоянию и процесс начнется снова.

Электрические колебания продолжались бы до бесконечности, если бы не неизбежное сопротивление току. Из-за него при каждом периоде энергия будет теряться и колебания, уменьшаясь по амплитуде, быстро затухнут.

Бросающаяся в глаза аналогия с колебаниями груза на пружине позволяет нам обойтись без алгебраического рассмотрения процесса и сообразить, каков будет период колебаний в таком контуре. (Читателю надо освежить в памяти соответствующие страницы первой книги.) Действительно, достаточно очевидно, что электрическая энергия конденсатора эквивалентна потенциальной энергии сжатой пружины, а магнитная энергия катушки — кинетической энергии грузика.

Сопоставляя аналогичные величины, мы «выводим» формулу периода электрических колебаний, происходящих в контуре: $\frac{1}{2}q^2/C$ — аналог $\frac{1}{2}kx^2$; $\frac{1}{2}LI^2$ — аналог $\frac{1}{2}mv^2$; k — аналог $1/C$; L — аналог m . Значит, частота колебания $\nu = \frac{1}{2\pi \sqrt{LC}}$, поскольку для механического колебания соответствующая формула

имеет вид

$$v = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}}.$$

Теперь попробуем угадать ход мыслей Герца, который поставил перед собой задачу, не выходя за пределы лаборатории, доказать существование электромагнитных волн, распространяющихся со скоростью 300 000 км/с. Итак, требуется получить электромагнитную волну длиной порядка 10 м. Если Максвелл прав, то для этого нужно, чтобы электрический и магнитный векторы колебались бы с частотой $3 \cdot 10^8$ герц... простите — обратных секунд. Ведь в то время Герц не знал, что его имя будет увековечено названием единицы частоты.

С чего же начать? Прежде всего, поскольку колебания затухающие, надо создать устройство, которое возобновляло бы процесс после того, как ток прекратится. Это сделать нетрудно. Схема показана на рис. 5.6. На первичную обмотку трансформатора T подается переменное напряжение. Как только оно достигнет пробивного напряжения между шариками, подключенными ко вторичной обмотке, тут же проскочит искра. Она-то и замыкает колебательный контур K , играя роль ключа, и в контуре с более или менее высокой частотой пробежит десяток колебаний с уменьшающейся амплитудой.

Но частота должна быть высокой. Что для этого надо сделать? Уменьшить самоиндукцию и уменьшить емкость. Как? Заменяем катушку прямым проводом, а пластины конденсатора начинаем раздвигать и уменьшать их площадь. Во что же вырождается колебательный контур? Да от него просто ничего не остается: два стержня, заканчивающиеся шариками, между которыми проскакивает искра.

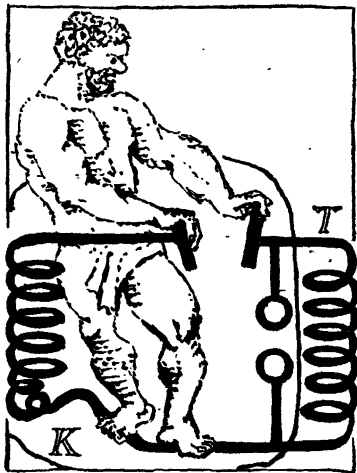


Рис. 5.6.

Так Герц и пришел к идее своего вибратора или осциллятора, который может служить как источником, так и приемником электромагнитных волн.

Предсказать заранее, чему будут равны индуктивность и емкость такого своеобразного «контура», от которого остались в полном смысле слова рожки да ножки, Герцу было трудно. Индуктивность и емкость вибратора не сосредоточены в одном месте цепи, а распределены вдоль стержней. Теория нужна другая.

Но обсуждение этого нового подхода к электрическим цепям, в которых протекают токи очень высокой частоты, завело бы нас слишком далеко. Читатель может поверить нам на слово, что в вибраторе Герца действительно возникают колебания тока высокой частоты.

«Передатчик» и «приемник» волн, использованные Герцем, были практически одинаковы. В «передатчике» колебания возбуждались искрой, которая периодически проскакивала между шариками в соответствии с работой трансформатора, подводившего к вибратору напряжение. Искровой промежуток можно было менять микрометрическим винтом. Приемниками служили либо прямоугольный виток провода, прерванный искровым промежутком, либо два стерженька, которые можно было сближать по желанию до расстояний в доли миллиметра.

В своей первой работе, опубликованной в 1885 г., Герц показывает, что описанным выше способом можно получать колебания очень высокой частоты, что эти колебания действительно создают в окружающем пространстве переменное поле, о наличии которого можно судить по искре, проскакивающей в «приемнике». Принимающий вибратор Герц назвал резонатором. Ему сразу же был очевиден тот принцип обнаружения электромагнитного поля, который лежит в основе современной радиотехники.

Кстати, стоит заметить, что в работах Герца и несколько десятилетий после него слова «электромагнитные волны» и «радиоволны» не были в ходу. Говорили об электрических волнах или о волнах электродинамической силы.

В своей следующей работе Герц показывает, что в соответствии с требованиями теории Максвелла диэлектрическая среда (брусек серы или парафин)



ГЕНРИХ ГЕРЦ (1857—1894) — замечательный немецкий физик, доказавший на опыте с помощью «генератора» и «резонатора», что колебательный разряд вызывает в пространстве электромагнитные волны. Герц показал, что электромагнитные волны отражаются, преломляются и интерферируют, чем подтвердил теорию Максвелла. Опыты Генриха Герца положили начало радиотехнике. В своей первой радиопередаче изобретатель радио Александр Степанович Попова в 1895 г. передал два слова: «Генрих Герц».

сказывается на частоте электромагнитного поля. Получивши эту статью, редактор журнала Гельмгольц ответил Герцу открыткой: «Манускрипт получен. Bravo. В четверг пошлю в печать».

Огромное впечатление на физиков того времени произвела работа Герца, в которой он доказал отражение электромагнитных волн. Волны отражались от цинкового экрана величиной $4 \text{ м} \times 2 \text{ м}$. Вибратор находился на расстоянии 13 м от экрана и на высоте 2,5 м от пола. Настроенный резонатор был помещен на той же высоте и перемещался между вибратором и экраном. Располагая резонатор на различных расстояниях от экрана и наблюдая интенсивность искры, Герц устанавливает наличие максимумов и минимумов, характерных для картины интерференции, носящей название стоячей волны. Длина волны оказалась близкой к 9,6 м.

Я хотел бы подчеркнуть, что в то время никто не мог сказать, какой материал должен служить зеркалом для электромагнитных волн. Это сейчас мы знаем, что волны таких длин не проникают в металл, а отражаются от него.

Стремясь получить дополнительные доказательства теории Максвелла, Герц уменьшает геометрические размеры своих приборов и доводит длину волны до 60 см. В 1888 г. он публикует работу «О лучах электрической силы». Ему удалось концентрировать электромагнитную энергию с помощью параболических зеркал. В фокусе зеркал размещались стерженьки вибратора и резонатора. Пользуясь этими зеркальными приемником и передатчиком, Герц показывает, что электромагнитные волны не проходят через металлы, а деревянные экраны волн не задерживают.

На рис. 5.7 показано, как Герц доказал поляризацию электромагнитных волн. На пути электромагнитного луча, созданного вибратором АА, помещалась решетка С из медных проволок. Поворачивая решетку, Герц показал, что интенсивность искры в резонаторе В — В меняется. Когда проволоки были параллельны электрическому вектору и перпендикулярны осям вибраторов, луч не проходил. Поперечность электромагнитной волны была доказана.

Наконец, для изучения преломления волн Герц изготавливает из асфальтовой массы призму весом более

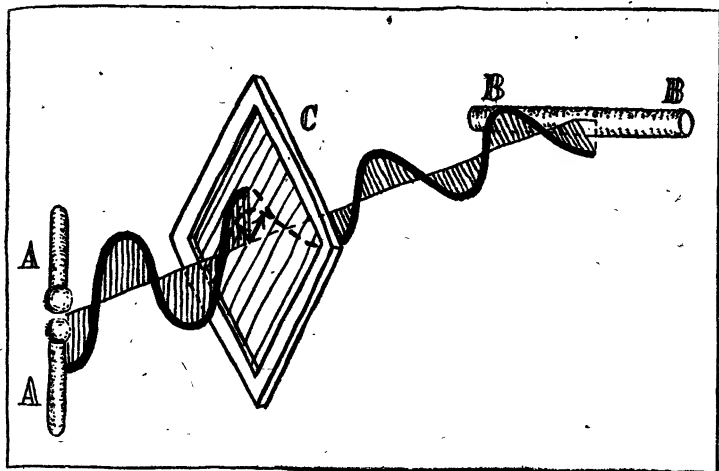


Рис. 5.7.

тонны. Коэффициент преломления асфальта можно было измерить для волн длиной 60 см с большой точностью. Он оказался равным 1,69.

Доказательство существования электромагнитных волн, измерение их длины, установление законов отражения, преломления и поляризации! И все это — результат трехлетней работы. Есть от чего прийти в восхищение.

КЛАССИФИКАЦИЯ ЭЛЕКТРОМАГНИТНОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Физикам приходится иметь дело с электромагнитным излучением огромного диапазона. Электромагнитное излучение тока городской частоты абсолютно ничтожно. Практическая возможность уловить электромагнитное излучение начинается от частот порядка десятков килогерц, т. е. длин волн, равных сотням километров. Наиболее короткие волны имеют длину порядка десятитысячных долей микрометра, т. е. частоты порядка миллиардов гигагерц.

Радиоволнами называют то электромагнитное излучение, которое создается электротехническими сред-

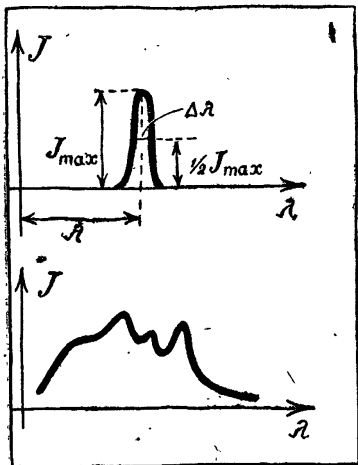


Рис. 5.8.

это 0,38—0,74 микронметра. Более длинноволновое излучение, полученное не радиотехническими способами, называют инфракрасным, а более коротковолновое — ультрафиолетовым вплоть до длин около 0,1 микронметра.

Электромагнитное излучение, получаемое в рентгеновских трубках, перекрывается с областью ультрафиолетовых волн и доходит до 0,01 микронметра, где в свою очередь перекрывается с областью гамма-лучей. Последние возникают при ядерном распаде, ядерных реакциях и столкновениях между элементарными частицами.

Основной характеристикой любого электромагнитного излучения является его спектр. Спектром называют график, на котором по вертикали отложена интенсивность (т. е. энергия, приходящаяся в единицу времени на единицу площади), а по горизонтали — длина волны или частота. Самым простым спектром является монохроматическое («одноцветное») излучение. Его график состоит из одной линии очень малой ширины (рис. 5.8, вверху). Степень монохроматичности линии характеризуют отношением $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$. Радиостанции дают почти монохроматическое излучение. Например, для

ствами, т. е. за счет колебания электрических токов. Самые короткие длины радиоволн — это сотые доли миллиметра.

От нескольких сотен микронметров и ниже простирается область длин волн излучения, возникающего за счет энергетических переходов внутри молекул, внутри атомов и внутри атомных ядер. Этот диапазон, как мы видим, существенно перекрывается с радиодиапазоном.

Видимое световое излучение занимает узкий участок. Его пределы —

коротковолновой станции, работающей в диапазоне 30 м, $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$ равно примерно 1000.

Возбужденные атомы, например атомы газов в лампах дневного света (возбуждение происходит за счет соударения положительно и отрицательно заряженных частиц, движущихся к аноду и катоду), дают спектр, состоящий из множества монохроматических линий с относительной шириной $(100\,000)^{-1}$. В магнитном резонансе наблюдают линии, имеющие ширину до 10^{-2} .

Строго говоря, сплошных спектров не существует. Однако если линии перекрываются, то опыт приводит к кривой интенсивности, показанной на том же рисунке внизу.

Сведения об электромагнитном спектре можно получать как исследуя излучение, так и изучая поглощение. Вообще говоря, оба опыта несут одну и ту же информацию. Это ясно из основного закона квантовой физики. В случае излучения система переходит с верхнего энергетического уровня на нижний, в случае поглощения — с нижнего уровня на верхний. Но разность энергий, которая определяет частоту излучения или поглощения, будет одной и той же. Какой спектр исследовать, излучения или поглощения, — это вопрос удобства.

Характеризуя спектр излучения, мы можем, разумеется, пользоваться как волновым, так и корпускулярным языком. Пользуясь волновым аспектом излучения, мы говорим, что интенсивность пропорциональна квадрату амплитуды волны. Рассматривая излучение как поток частиц, мы подсчитываем интенсивность как число фотонов.

Еще раз повторим, что нас ни в какой мере не должно смущать поочередное пользование обоими аспектами излучения. Излучение не похоже ни на волну, ни на поток частиц. Обе картины — это всего лишь модели, которыми удобно пользоваться при объяснении тех или иных явлений.

Мы не привели шкалу электромагнитных волн, но сказали достаточно отчетливо, что названия различных ее участков в некоторой степени условны, и, во всяком случае, можно столкнуться со случаями, когда волны

одной и той же длины будут называться по-разному в зависимости от способа их получения.

Сейчас шкала электромагнитных волн сплошная. Нет таких участков, которые не удавалось бы получить тем или иным способом.

Но перекрывания инфракрасных волн с радиоволнами, гамма-лучей с рентгеновскими и т. д. были открыты сравнительно недавно. Долгое время существовал пробел между короткими радиоволнами и инфракрасными волнами. Волны длиной 6 мм получил в 1895 году замечательный русский физик Петр Николаевич Лебедев, а тепловые (инфракрасные) волны длиной до 0,34 мм — Рубенс.

В 1922 году А. А. Глаголева-Аркадьева ликвидировала и этот пробел, получив неоптическим способом электромагнитные волны длиной от 0,35 мм до 1 см.

В настоящее время волны этой длины получают радиотехниками без труда. Но в то время автору пришлось потратить не мало остроумия и изобретательности для того, чтобы создать прибор, который ею был назван массовым излучателем. Источником электромагнитного излучения явились металлические опилки, взвешенные в трансформаторном масле. Через эту смесь пропускался искровой разряд.

СТРАНИЧКИ ИСТОРИИ

Так же как Фарадей не догадывался, что открытие электромагнитной индукции приведет к созданию электротехники, и Резерфорд считал чуть ли не невежеством болтовню о том, что из атомного ядра можно будет извлечь энергию, так и Генрих Герц, обнаруживший электромагнитные волны и показавший, что возможно их улавливать на расстоянии в несколько метров, не только не помышлял о радиосвязи, но даже отрицал ее возможность. Занятные три факта, не правда ли? Но обсуждение их — задача психолога. Поэтому, ограничившись констатацией этого удивительного обстоятельства, посмотрим, как развивались события после ранней кончины Генриха Герца, последовавшей в 1894 г.

Классические опыты Герца, которые мы описали достаточно подробно, привлекли к себе внимание ученых всего мира. Профессор Петербургского университета Н. Г. Егоров точно скопировал эти опыты. Искра в резонаторе была еле заметной. Ее можно было рассмотреть лишь в полной темноте, да и то с помощью увеличительного стекла.

Александр Степанович Попов (1859—1906), скромный преподаватель электротехники в военном училище города Кронштадта, в 1889 г., в возрасте 30 лет, принялся совершенствовать опыты Герца. Искры, которые он получал в своих резонаторах, были куда сильнее тех, которые удавалось создать другим исследователям.

Осенью 1894 г. в английском журнале «Electrician» появилась статья известного физика Оливера Лоджа,

который сообщил о том, что резонатор Герца можно усовершенствовать, если использовать трубку Бранли. Французский ученый Эдуард Бранли изучал проводимость металлических опилок. Он обнаружил, что эти опилки не всегда оказывали одинаковое сопротивление электрическому току. Оказалось, что сопротивление опилок, насыпанных в трубку, резко падает, если она расположена вблизи резонатора Герца. Происходило это потому, что опилки слипались. Сопротивление опилок можно было восстановить, но для этого трубку следовало встряхнуть.

Вот этим-то свойством металлических опилок и воспользовался Лодж. Он составил цепь из трубки Бранли (которая получила название когерера, т. е. «слипателя»), батареи и чувствительного гальванометра. В момент прохождения электромагнитных волн стрелка прибора отклонялась. Лоджу удалось обнаружить радиоволны вплоть до расстояний около 40 м.

Неудобство этой системы заключалось в том, что когерер тут же выходил из строя. Нужно было придумать способ, каким образом возвращать сцепившиеся (сварившиеся) опилки в прежнее состояние, и притом придумать такую схему, чтобы встряхивание происходило бы «само собой».

Вот эту задачу и решил Попов. Он перепробовал много разных устройств когерера и в конечном счете остановился на следующей конструкции. «Внутри стеклянной трубки на ее стенках приклеены две полоски тонкой листовой платины AB и CD почти во всю длину трубки. Одна полоска выведена на внешнюю поверхность с одного конца трубки, другая — с противоположного конца. Полоски платины лежат своими краями на расстоянии около 2 мм при ширине 8 мм; внутренние концы полосок B и C не доходят до пробок, закрывающих трубку, чтобы порошок, в ней помещенный, не мог, набившись в пробку, образовать проводящие нити, неразрушаемые сотрясением, как то случилось в некоторых моделях. Длина всей трубки достаточна в 6—8 см при диаметре около 1 см. Трубка при своем действии располагается горизонтально, так что полоски лежат в нижней ее половине и металлический порошок покрывает их. Наилучшее действие получается, когда трубка наполнена не более чем наполовину».

Схема когерера Попова, описанная его словами, показана на рис. 6.1. Попов употреблял железный или стальной порошок.

Но главной задачей было не усовершенствование когерера, а изобретение способа возвращения его в исходное состояние после приема электромагнитной волны. В первом приемнике Попова, схема которого показана на рис. 6.2, эту работу выполнял обыкновенный электрический звонок. Звонок заменяет стрелку гальванометра, а его молоточек ударяет по стеклянной трубке, когда возвращается в исходное положение.

Какое простое решение головоломной задачи! И взаправду простое. Оцените, читатель, главную идею, де которой не додумались такие превосходные физики, как Герц и Оливер Лодж. Ведь в простой схеме впервые используется то, что техники называют релейной схемой. Ничтожная энергия радиоволн принимается не

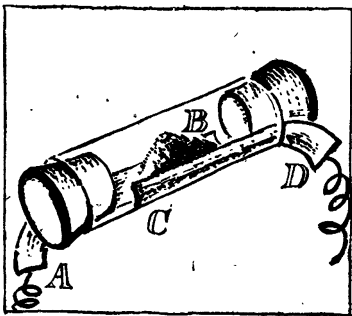


Рис. 6.1.

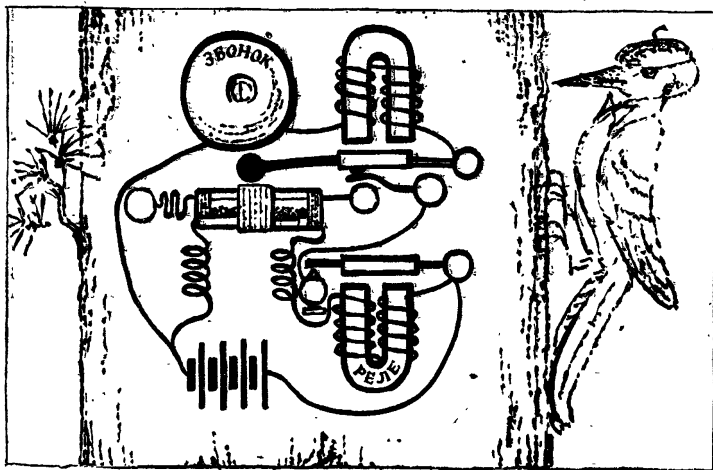
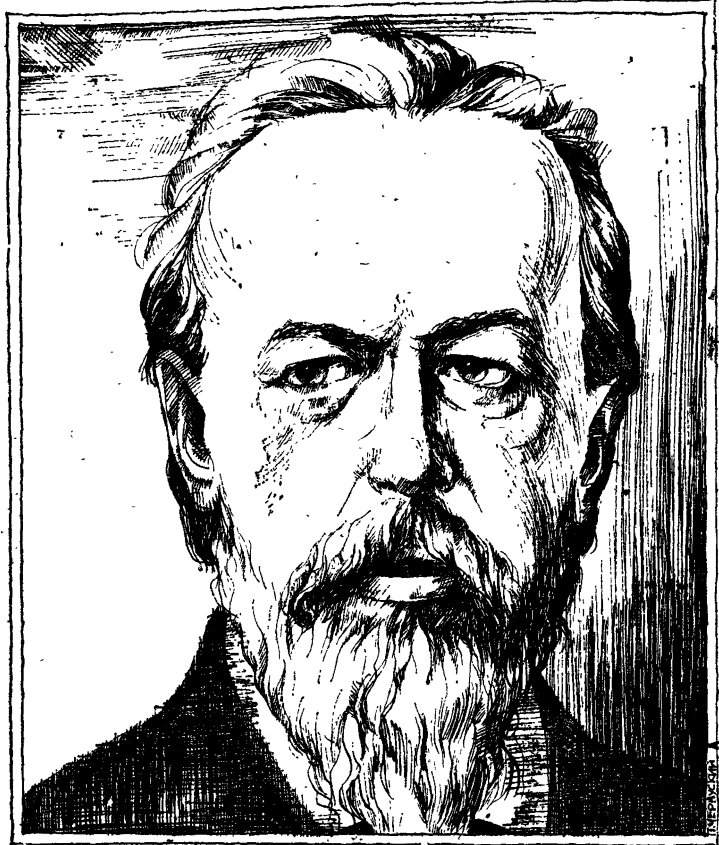


Рис. 6.2.



ПОПОВ АЛЕКСАНДР СТЕПАНОВИЧ (1859—1906) — русский физик, электротехник — изобретатель радио. Работы А. С. Попова получили высокую оценку современников. В 1900 году на Всемирной выставке в Париже ему была присуждена за его изобретение золотая медаль.

непосредственно, а используется для управления цепью тока.

В весенние дни 1895 года Попов вынес свой опыт в сад. Приемник начали отдалять от вибратора. 50 метров — звонок откликается на искру вибратора, 60 метров — работает, 80 метров — молчит. Тогда Попов подносит к приемнику моток медной проволоки, набрасывает его на дерево, а нижний конец присоединяет к когереру. Звонок зазвонил. Так появилась первая в мире антенна.

7 мая мы празднуем День радио. В 1895 г. в этот день Попов делает доклад под скромным названием «Об отношении металлических порошков к электрическим колебаниям» на очередном заседании Русского физико-химического общества. Среди присутствующих многие лица видели несколько лет назад демонстрацию опытов Герца, тех опытов, при которых крошечную искру надо было рассматривать в лупу. Но, услышав бойкие трели звонка приемника Попова, все поняли, что родился телеграф без проводов, появилась возможность передавать сигналы на расстояние.

— 12 марта 1896 г. Попов передает первую в мире радиограмму. На расстоянии 250 м из одного здания в другое замыканием ключа на короткие и длительные промежутки передаются слова «Генрих Герц», которые записываются на телеграфную ленту.

К 1899 г. дальность радиосвязи на кораблях учебного минного отряда достигает уже 11 км. Практическое значение беспроволочного телеграфа не подвергается сомнению даже самыми скептическими умами.

Итальянский изобретатель Гуглиемо Маркони начал свои опыты несколько позже Попова. Он тщательно следил за всеми достижениями в области электротехники и изучения электромагнитных волн и умело использовал их для улучшения качества радиоприема и радиопередачи. Его большая заслуга лежит не столько в технической стороне дела, сколько в организационной. Но и это не мало, так что имя Маркони следует произносить с уважением, не забывая в то же время, что бесспорный, признанный во всем мире приоритет в открытии радио принадлежит скромному русскому ученому, который всегда отказывался от того, чтобы отдать свои знания другой стране.



Рис. 6.3.

Маркони не упоминал Попова в своих статьях и выступлениях. Но не всем известно, что в 1901 г. он приглашал профессора А. С. Попова поступить на работу в акционерное общество, председателем коего он был.

Дальность радиоприема возрастала быстрыми темпами. В 1899 г. Маркони осуществляет радиосвязь между Францией и Англией, а в 1901 г. радио соединяет Америку с Европой.

Какие же технические новинки способствовали

этому успеху и рождению радиовещания?

Начиная с 1899 г., радиотехника начинает прощаться с когерером. Вместо того чтобы обнаруживать радиоволны за счет падения сопротивления в цепи, происходящего под действием электромагнитной волны, можно воспользоваться совсем другим приемом. Выпрямленная пульсирующая электромагнитная волна может быть принята на слух обычной телефонной трубкой.

Начинается поиск различных выпрямителей. Широко распространенный контактный детектор, который применялся вплоть до двадцатых годов нашего века, представлял собой кристалл с односторонней проводимостью. Такие кристаллы были известны с 1874 г. К ним относятся сульфиды металлов, медные пириты, сотни различных минералов. Мои сверстники помнят такие приемники и раздражающую процедуру поиска «хорошего контакта» с помощью пружинящей иглы, который возникал тогда, когда острие пружины упиралось в «подходящую» точку кристалла (рис. 6.3). В это время работало уже много радиостанций, а посему приемник надо было настраивать на волну, что и достигалось контактным переключением, если имелся в виду прием считанного числа станций, или плавным изме-

нением емкости конденсатора, который осуществляется и в современных устройствах.

От искровых радиостанций было трудно, если не невозможно, получить большие мощности: нагревался разрядник. Им на смену пришли вольтова дуга и машина высокой частоты. Подсчет мощности пошел на сотни киловатт.

Однако настоящую революцию в радиосвязи, позволившую перейти от радиотелеграфии к передаче человеческой речи и музыки, принесло использование электронной лампы.

В октябре 1904 г. английский инженер электрик Джон Флеминг (1849—1945) показал, что высокочастотный электрический ток может быть выпрямлен с помощью вакуумной лампы, состоящей из накаливаемой током нити, окруженной металлическим цилиндром. На рис. 6.4 приводится ее схема. Флеминг сознавал значимость вакуумного диода для превращения электрических колебаний в звук (он называл также эту лампу аудионом, от латинского слова «аудио» — слушаю), однако не сумел добиться широкого применения своего детектора.

Лавры изобретателя электронной лампы достались американцу Ли де Форесту (1873—1950). Он первый превратил лампу в триод (1907 г.). Ламповый приемник Ли де Фореста принимал сигналы на сетку лампы, выпрямлял их и позволял прослушивать на телефоне телеграфные сигналы.

Возможности электронной лампы, как усилителя, были очевидны американскому инженеру. Но лишь через шесть лет, в 1913 г., немецкий инженер Мейсснер применил триод в генераторной схеме.

Попытки передачи речи, т. е. модулирования электромагнитной волны, производились до использования

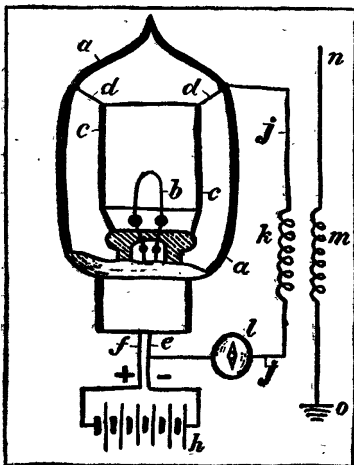


Рис. 6.4.

электронной лампы в качестве генератора. Но трудности были очень велики, полоса частот модуляции не могла быть сделана широкой. Кое-как удавалось передавать человеческий голос, но не музыку. Лишь в двадцатых годах радиопередатчики и радиоприемники, работающие на электронных лампах, позволили увидеть воистину неисчерпаемые возможности радиосвязи как передачи, охватывающей весь диапазон звуковых частот.

Следующий революционный скачок произошел совсем недавно, когда полупроводниковые элементы вытеснили из радиосхем электронные лампы. Возникла новая отрасль прикладной физики, рассматривающая огромный комплекс проблем, связанных с приемом, передачей и хранением информации.

ЛАМПОВЫЙ ТРИОД И ТРАНЗИСТОР

Ламповые триоды произвели революцию в радиотехнике. Но техника стареет быстрее, чем люди. Уже сейчас электронную лампу можно назвать старушкой, и если вы пойдете в магазин, торгующий телевизорами, то наверняка услышите, как нетерпеливые покупатели спрашивают о выпуске телевизоров на полупроводниках. Не сомневаюсь, что они будут в продаже в большом количестве, когда эта книга увидит свет.

Но старость заслуживает уважения, и кроме того принципы двух фундаментальных применений ламп и транзисторов, а именно усиления и генерирования

волн определенной частоты, проще объяснить на примере электронной лампы. Поэтому на ее действии мы остановимся подробнее, чем на работе транзистора.

В колбу трехэлектродной лампы, кроме анода и разогреваемой током катодной нити, впаян еще третий электрод, который называется сеткой. Элект-

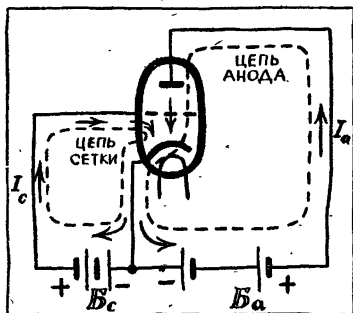


Рис. 6.5.

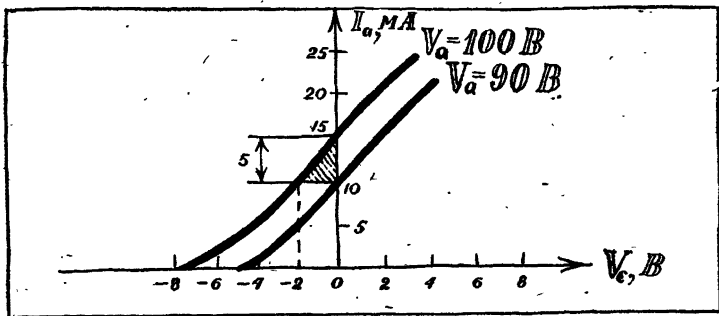


Рис. 6.6.

роны свободно проходят через сетку. Ее отверстия во столько же раз больше размеров электронов, во сколько Земля больше пылинки. На рис. 6.5 показано, как сетка позволяет управлять анодным током. Очевидно, что отрицательное напряжение на сетке будет уменьшать анодный ток, положительное — увеличивать.

Прделаём простой эксперимент. Наложим между катодом и анодом напряжение в 100 вольт. Затем начнем менять сеточное напряжение — скажем, как это показано на рис. 6.6, примерно в пределах от минус восьми вольт до плюс пяти. С помощью амперметра будем измерять ток, протекающий через анодную цепь. Получится кривая, которая показана на рисунке. Она называется характеристикой лампы. Повторим эксперимент, беря теперь анодное напряжение равным 90 вольтам. Получим похожую кривую:

Теперь обратите внимание на следующий замечательный результат. Как видно из заштрихованного на рисунке треугольника, можно добиться усиления анодного тока на 5 миллиампер двумя способами: либо увеличив анодное напряжение на 10 вольт, либо увеличив сеточное напряжение на 2 вольта. Введение сетки делает ламповый триод усилителем. Коэффициент усиления в примере, который мы рассмотрели, равен 5 (десять, поделенное на два). Иными словами, напряжение на сетке действует на анодный ток в пять раз сильнее, чем анодное.

Теперь рассмотрим, как триод позволяет генерировать волны определенной длины.

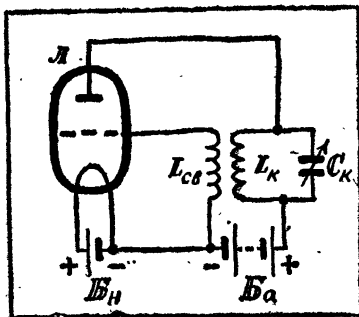


Рис. 6.7.

Соответствующая предельно упрощенная схема показана на рис. 6.7. При включении анодного напряжения начинается зарядка конденсатора C_K колебательного контура через лампу. Нижняя обкладка будет заряжаться положительно. Незамедлительно наступит процесс разрядки конденсатора через катушку самоиндукции L_K . Возникнут свободные

колебания. Они затухли бы, если бы энергия не поступала все время от лампы. А как добиться, чтобы эта энергетическая поддержка происходила в такт и колебательный контур «раскачивался» бы наподобие качелей? Для этого нужна так называемая *обратная связь*. В катушке $L_{св}$ ток колебательного контура наводит ЭДС индукции той же частоты, что и частота свободных колебаний. Таким образом, сетка создает в анодной цепи пульсирующий ток, который будет раскачивать контур с его собственной частотой.

Описанные два гениальные принципа создали радиотехнику и сопряженные с ней области. Электронная лампа сходит со сцены и уступает свое место транзистору, но идеи усиления и генерирования электромагнитных колебаний остались теми же.

В транзисторе, как и в ламповом триоде, малой мощностью во входной цепи можно управлять большой мощностью в выходной цепи. Есть различие в характере управления. Анодный ток лампы, как мы только что видели, зависит от сеточного напряжения, а величина тока коллектора зависит от величины тока эмиттера.

Но мы еще не сказали, что представляет собой транзистор. Он имеет три электрода. Эмиттер соответствует катоду, коллектор — аноду и база (или основание) — сетке. Вывод от эмиттера является входом, а от коллектора — выходом.

Транзистор, как это видно из рис. 6.8, состоит из двух переходов $p-n$ -типа. Можно, чтобы p -слой был

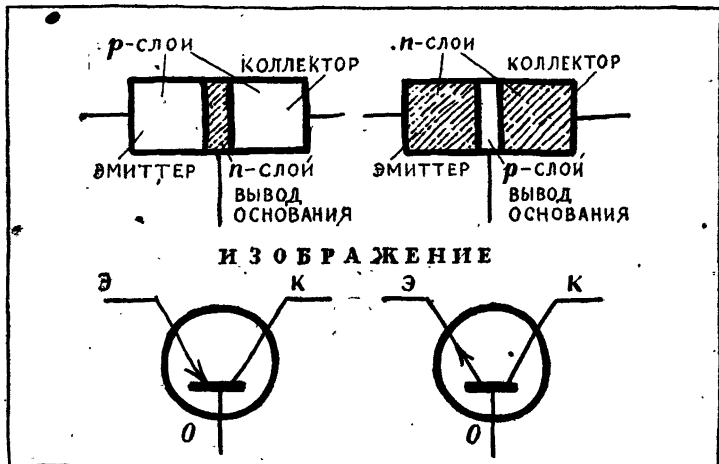


Рис. 6.8.

посередине, а можно и иметь транзисторы $n - p - n$ -типа.

На эмиттер всегда подается напряжение положительного смещения, так что он может давать большое число основных носителей заряда. Когда эмиттерная цепь низкого сопротивления изменяет ток в коллекторной цепи высокого сопротивления, то в этом случае получаем усиление.

Схемы включения транзисторов и их использование в качестве усилителей и генераторов в общем аналогичны принципам работы лампового триода. Но мы не будем здесь обсуждать эту важнейшую область современной физики.

РАДИОПЕРЕДАЧА

Классифицировать виды радиопередач можно по мощности станции. Крупные радиостанции посылают в эфир мощности, достигающие до мегаватта. Крошечный радиопередатчик, с помощью которого автоинспектор сообщает своему коллеге, что автомобиль ММЦ 35-69 проехал на красный свет и подлежит задержанию,

излучает мощность порядка милливатта. Для некоторых целей достаточны и меньшие мощности.

Существенны различия в устройстве станций, работающих на волнах с длиной более нескольких метров, и передающих устройств, излучающих ультракороткие волны длиной в десятки, а то и доли сантиметров. Но и внутри каждого диапазона длин волн и мощностей у инженера, проектирующего станцию, огромный выбор схем, который может быть продиктован местностью, специфическими целями, экономическими соображениями, да и просто технической выдумкой.

Основой радиопередатчика является генератор радиоволн. На каком вы хотите остановить свое внимание? Возможностей по крайней мере пять. Можно взять ламповый генератор. Диапазон его исключительно широк. Мощности могут колебаться от долей ватта до сотен киловатт, частоты — от десятков килогерц до нескольких гигагерц. Но если вам нужны малые мощности порядка десятых долей ватта, то вас устроит лишь транзисторный генератор. Наоборот, придется пока что (но вероятно ненадолго) отказаться от транзисторов, если нужны мощности более нескольких сотен ватт. Ну, а если речь идет о мощностях, для которых годятся оба типа генераторов, то конструктор, вероятно, предпочтет транзисторный вариант. Без сомнения, элегантность инженерного решения выиграет. Передатчик на транзисторах займет значительно меньше места и, если требуется, его гораздо легче сделать подвижным, чем передатчик на ламповом генераторе.

Более специализированное применение имеют магнетронный и клистронный генераторы. Первый может оказаться весьма полезным, если в пространство надо посылать импульсы мощностью в несколько мегаватт. Диапазон частот, для которых годится магнетронный генератор, много уже, он лежит примерно между 300 меггерц и 300 гигагерц.

Для этого же диапазона ультракоротких волн используются и клистроны. Но ими интересуются лишь в том случае, если речь идет о малых мощностях, не превосходящих нескольких ватт в сантиметровом и нескольких милливатт в миллиметровом диапазоне.

Эти два последние генератора, так же как и пятый тип — квантовый генератор, весьма специфичны и

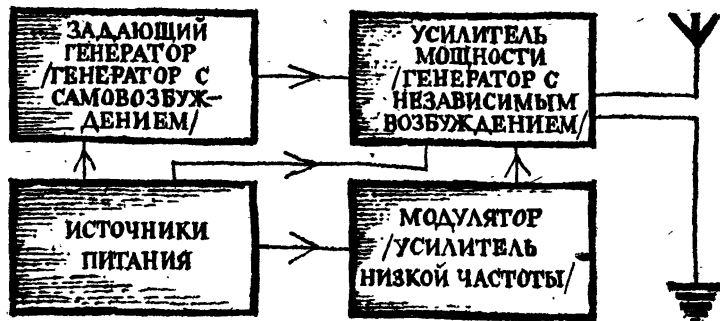


Рис. 6.9.

нуждаются в особом рассмотрении. Что же касается транзисторных и ламповых передающих устройств, то они похожи. Существуют четкие радиотехнические правила, действуя по которым можно заменить лампу на эквивалентный ей транзистор.

Но выбор генератора электромагнитных колебаний — это еще далеко не все. Надо решить, каким образом усилить мощность, создаваемую первичным (или, как говорят, задающим) генератором. Нужно также выбрать способ модуляции несущей волны звуковой частотой. Имеется также много вариантов передачи энергии на антенное поле. Да и сама организация антенного поля дает широкий простор для инженерной фантазии.

В радиотехнике очень часто прибегают к так называемым блок-схемам. На рисунке изображают несколько прямоугольников с надписями. А что находится в каждом ящике — объясняют по мере необходимости. Блок-схема радиостанции показана на рис. 6.9. Задающий генератор создает незатухающие почти гармонические колебания той самой частоты и длины волны, на которые вы настраиваете, при желании поймать передачу этой станции, свой приемник. Второй блок — это усилитель мощности. Название говорит само за себя, а об устройстве его мы рассказывать не станем. Задача блока под названием модулятор — превратить звуковые колебания в электрические и наложить их на несущую волну радиостанции.

Модуляция может производиться различными способами. Проще всего объяснить, как происходит частотная модуляция. Микрофон в ряде случаев представляет собой конденсатор, емкость которого меняется благодаря звуковому давлению: ведь емкость зависит от расстояния между пластинами. Представьте себе теперь, что такой конденсатор включен в колебательный контур, генерирующий волну. Тогда частота волны будет меняться в соответствии со звуковым давлением.

Поскольку мы «влезли» с микрофоном в колебательный контур, то в эфир отправляется не строго определенная частота, а некоторая полоса частот. Достаточно очевидно, что в идеале это размытие должно захватывать весь звуковой интервал частот, который, как нам известно, равен примерно 20 кГц.

Если радиопередача идет на длинных волнах, которым соответствуют частоты порядка 100 кГц, то полоса пропускания составляет пятую часть от несущей частоты. Ясно, что на длинных волнах не удастся обеспечить работу большого числа неперекрывающихся станций. Совершенно меняется дело для коротких волн. Для частоты 20 МГц ширина полосы будет составлять уже доли процента от значения несущей частоты.

Нет, наверное, в нашей стране ни одного дома, в котором не было бы розетки для радио. Эти передачи вы принимаете от так называемой радиотрансляционной сети. Ее также называют проводным вещанием.

Впервые трансляционная однопрограммная сеть появилась в Москве в 1925 г. Передача шла одновременно через 50 громкоговорителей.

Однопрограммное вещание ведется на звуковых частотах. Из радиостудии программа передается по проводам на центральную усилительную станцию. От центральной станции, опять-таки по проводам, звуковые колебания передаются на опорные пункты, где еще раз усиливаются и передаются по магистральным фидерным линиям на трансформаторные подстанции. От каждой подстанции провода опять расходятся по подстанциям, так сказать, следующего ранга. В зависимости от величины города или области число звеньев цепи и, соответственно, число понижений напряже-

ния может быть различным. В абонентских линиях напряжение равно 30 вольтам.

С 1962 г. в городах нашей страны внедряется трехпроводное вещание. Передача двух дополнительных программ производится по автономным сетям методом амплитудной модуляции с несущими частотами 78 и 120 кГц. Эти две передачи вы будете демодулировать (т. е. выделять звук и «отсеивать» высокую частоту) у себя дома поворотом ручки сетевого приемника «Маяк» или ему подобного.

Таким образом, при трехпрограммном вещании по одному и тому же проводу идут одновременно три программы: одна — главная — на звуковых частотах и две недемулированные. Поэтому их передача не мешает друг другу. Просто придумано, а результат превосходный! Экономичность, надежность и высокое качество передачи позволяют полагать, что проводному вещанию предстоит большое будущее, включая создание проводных сетей для телевидения.

РАДИОПРИЕМ

Конструкций радиоприемников существует несчетное множество. Область радиоэлектроники развивается исключительно быстро, так что вдобавок приемники быстро стареют, и каждый год в магазинах появляются новые изделия, которые лучше предыдущих.

Что значит «лучше» по отношению к радиоприемнику? Ответ известен каждому читателю, даже и тому, который не разбирается в физике. Хороший приемник должен выделить из хаоса радиоволн, которые приходят к антенне, лишь те сигналы, которые нужны. Это свойство носит название избирательности. Приемник должен быть как можно более чувствительным, т. е. должен принимать самые слабые сигналы. И, наконец, он должен воспроизводить музыку и речь станций, на которую мы настроились, без всяких искажений.

Итак, чувствительность, избирательность и точность. Пожалуй, можно добавить еще одно пожелание: приемник должен хорошо работать на всех диапазонах волн.



Рис. 6.10.

Блок-схема радиоприемника прямого усиления достаточно очевидна (рис. 6.10). Прежде всего надо выделить нужную длину волны и усилить колебания высокой частоты, которые создает в антенне волна интересующей нас станции. Далее необходимо произвести детектирование, или демодуляцию, — так называется процесс «отбрасывания» несущей частоты и выделения из электрического тока той информации, которая несет звук. Наконец, придется установить еще один усилитель — уже для низкочастотных колебаний. Завершающей стадией является превращение этих электрических колебаний в звуковые, что выполняется динамиком или телефонными наушниками, которыми пользуются деликатные люди, не желающие причинять беспокойство соседям.

Антенна радиоприемника обычно индуктивно связана с колебательными контурами нескольких диапазонов. Когда мы поворачиваем ручку диапазонов, то совершаем операцию, которая схематически показана на рис. 6.11. В пределах каждого диапазона мы настраиваемся обычно, меняя емкость конденсатора приемного колебательного контура. Способность приемника избрать частоту оптимальным образом определяется кривой резонанса колебательного контура.

Передо мной паспорт автомобильного приемника. Избирательность его характеризуется величиной 9 кГц для диапазонов длинных и средних волн. Это, конечно, далеко не предел, которого можно достигнуть.

Чувствительность приемника характеризуют наименьшей величиной ЭДС в антенне приемника, которая

дает возможность достаточно отчетливо (не могу сказать, чтобы эта формулировка была точной) слушать передачу. В автомобильном приемнике чувствительность для длинных волн — не хуже 175 мкВ, для диапазона УКВ — не хуже 5 мкВ.

Чувствительность зависит от коэффициента усиления и от внутренних шумов. Коэффициенты

усиления приемников колеблются в пределах 10^5 — 10^8 . Отсюда следует, что станция, которую я хочу принять, должна создавать в антенне приемника ЭДС индукции не меньше 10^{-8} мкВ.

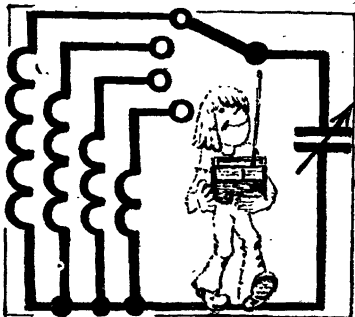


Рис. 6.11.

РАСПРОСТРАНЕНИЕ РАДИОВОЛН

Самый простой случай — это распространение радиоволны в свободном пространстве. Уже на небольшом расстоянии от радиопередатчика его можно считать точкой. А если так, то фронт радиоволны можно считать сферическим. Если мы проведем мысленно несколько сфер, окружающих радиопередатчик, то ясно, что при отсутствии поглощения энергия, проходящая через сферы, будет оставаться неизменной. Ну, а поверхность сферы пропорциональна квадрату радиуса. Значит интенсивность волны, т. е. энергия, приходящаяся на единицу площади в единицу времени, будет падать по мере удаления от источника обратно пропорционально квадрату расстояния.

Конечно, это важное правило применимо в том случае, если не приняты специальные меры для того, чтобы создать узко направленный поток радиоволн.

Существуют различные технические приемы для создания направленных радиолучей. Один из способов решения этой задачи состоит в использовании правильной решетки антенн. Антенны должны быть расположены так, чтобы посылаемые ими волны отправлялись

в нужном направлении «греб к гребу». Для этой же цели используются зеркала разной формы.

Радиоволны, путешествующие в космосе, будут отклоняться от прямолинейного направления — отражаться, рассеиваться, преломляться — в том случае, если на их пути встретятся препятствия, соизмеримые с длиной волны.

Наибольший интерес представляет для нас поведение волн, идущих вблизи земной поверхности. В каждом отдельном случае картина может быть весьма своеобразной, в зависимости от того, какова длина волны.

Кардинальную роль играют электрические свойства земли и атмосферы. Если поверхность способна проводить ток, то она «не отпускает» от себя радиоволны. Электрические силовые линии электромагнитного поля подходят к металлу (шире — к любому проводнику) под прямым углом.

Теперь представьте себе, что радиопередача происходит вблизи морской поверхности. Морская вода содержит растворенные соли, т. е. является электролитом. Морская вода — превосходный проводник тока. Поэтому она «держит» радиоволну, заставляет ее двигаться вдоль поверхности моря.

Но и равнинная, а также лесистая местности являются хорошими проводниками для токов не слишком высокой частоты. Иными словами, для длинных волн лес и равнина ведут себя как металл.

Поэтому длинные волны удерживаются всей земной поверхностью и способны обогнуть земной шар. Кстати говоря, этим способом можно определить скорость радиоволн. Радиотехникам известно, что на то, чтобы обогнуть земной шар, радиоволна затрачивает 0,13 секунды. А как же горы? Ну что же, для длинных волн они не столь уж высоки, и радиоволна длиной в километр более или менее способна обогнуть гору.

Что же касается коротких длин волн, то возможность дальнего радиоприема на этих волнах обязана наличию над землей ионосферы. Солнечные лучи обладают способностью разрушать молекулы воздуха в верхних областях атмосферы. Молекулы превращаются в ионы и на расстояниях 100—300 км от Земли образуют несколько заряженных слоев. Так что для коротких длин волн пространство, в котором движется

волна, — это слой диэлектрика, зажатого между двумя проводящими поверхностями.

Поскольку равнинная и лесистая поверхности не являются хорошими проводниками для коротких волн, то они не способны их удерживать. Короткие волны отправляются в свободное путешествие, но натываются на ионосферу, которая отражает их, как поверхность металла.

Ионизация ионосферы неоднородна и, конечно, различна днем и ночью. Поэтому пути коротких радиоволн могут быть самыми различными. Они могут добраться до вашего радиоприемника и после многократных отражений Землей и ионосферой. Судьба короткой волны зависит от того, под каким углом попадет она на ионосферный слой. Если этот угол близок к прямому, то отражения не произойдет и волна уйдет в мировое пространство. Но чаще имеет место полное внутреннее отражение и волна возвращается на Землю.

Для ультракоротких волн ионосфера прозрачна. Поэтому на этих длинах волн возможен радиоприем в пределах прямой видимости или с помощью спутников. Направляя волну на спутник, мы можем ловить отраженные от него сигналы на огромных расстояниях.

Спутники открыли новую эпоху в технике радиосвязи, обеспечив возможность радиоприема и телевизионного приема на ультракоротких волнах.

Интересные возможности предоставляет передача на сантиметровых, миллиметровых и субмиллиметровых волнах. Волны этой длины могут поглощаться атмосферой. Но, оказывается, имеются «окна», и, подобрав нужным образом длину волны, можно использовать волны, залегающие в оптический диапазон. Ну, а достоинства этих волн нам известны: в малый волновой интервал можно «вложить» огромное число перекрывающихся передач.

РАДИОЛОКАЦИЯ

Принципы радиолокации достаточно просты. По-сылаем сигнал, он отражается от интересующего нас объекта и возвращается обратно. Если объект находится на расстоянии 150 м, то сигнал возвратится

через 1 мкс, если на расстоянии 150 км, то через 1 мс. Направление, в котором посылается сигнал, является направлением линии, на которой находился самолет, ракета или автомобиль в тот момент, когда его встретил радиолуч.

Понятно, что радиоволна должна быть остронаправленной, угол раствора, в котором сосредотачивается основная часть мощности луча, должен быть порядка одного градуса.

Принцип действительно несложен, но техника далеко не проста. Начнем с того, что высокие требования предъявляются к генератору. В метровом и дециметровом диапазоне (более длинные волны явно не годятся) применяют ламповые генераторы, в сантиметровом диапазоне — клистроны и магнетроны.

Наиболее естественным представляется импульсный метод работы. В пространство периодически посылаются кратковременные импульсы. Длительность импульса в современных радиолокационных станциях лежит в пределах от 0,1 до 10 мкс. Частота повторения импульсов должна быть выбрана так, чтобы отраженный сигнал успел придти во время паузы.

Максимальная дальность, на которой можно обнаружить самолет и ракету, ограничена лишь условием прямой видимости. Читателю несомненно известно, что современные радиолокаторы способны принять сигналы, отраженные от любых планет нашей Солнечной системы. Разумеется, при этом должны использоваться волны, беспрепятственно проходящие через ионосферу. Удачно, что укорочение длины волны и непосредственно влияет на увеличение дальности локационного видения, поскольку она пропорциональна не только энергии посланного импульса, но и частоте излучения.

На экране осциллографа (электронно-лучевой трубки) можно видеть всплески от посланного и отраженного импульсов. Если самолет приближается, то отраженный сигнал будет сдвигаться в сторону посланного.

Радиолокаторы не обязательно должны работать в импульсном режиме. Предположим, самолет движется в сторону антенны со скоростью v . От него непрерывно отражается радиолуч. Эффект Доплера приводит к тому, что частота принимаемой волны будет

связана с частотой посланной волны уравнением:

$$v_{\text{пр}} = v_{\text{посл}} \left(1 + \frac{2v}{c} \right).$$

Величины частот определяются радиотехническими методами весьма точно. Настроившись в резонанс, мы определим $v_{\text{пр}}$ и по ее значению рассчитаем скорость. Если, скажем, частота посланного сигнала равняется 10^9 Гц, а самолет или ракета приближаются к антенне локатора со скоростью 1000 км/ч, то принимаемая частота будет больше передающей на величину 1850 Гц.

Отражение радиолуча от самолета, ракеты, теплохода или автомашины — это не отражение от зеркала. Длины волн соизмеримы или существенно меньше размеров отражающего объекта, имеющего сложную форму. При отражении от разных точек объекта лучи будут интерферировать между собой и рассеиваться в стороны. Оба эти явления приведут к тому, что эффективная отражающая поверхность объекта будет существенно отличаться от его истинной поверхности. Расчет здесь сложен, и лишь опыт работника, пользующегося локатором, помогает ему сказать, что за предмет встретился на пути луча.

Вы, конечно, видели радиолокационные антенны — проволочные сферические зеркала, которые все время находятся в движении — они обзоревают пространство. Можно заставить зеркало локатора совершать самые различные движения, например так, чтобы луч двигался, исчерчивая пространство строчками или окружностями. При такой работе можно не только определить дальность самолета, но и следить за траекторией его движения.

Этим способом ведут самолет на посадку в условиях отсутствия видимости. Такая задача может быть возложена и на человека, и на автомат.

Радиолокатор можно «обмануть». Во-первых, объект можно закрыть материалами, которые поглощают радиоволны. Для этой цели годятся угольная пыль, каучук. При этом вдобавок, чтобы уменьшить коэффициент отражения, покрытия выполняют гофрированными, заставляя таким методом львиную долю излучения рассеиваться беспорядочно во все стороны.

Если с самолета сбрасывать пачками полоски алюминиевой фольги или металлизированного волокна, то радиолокатор будет полностью дезориентирован. Впервые этот прием применили англичане еще во время второй мировой войны. Наконец, третий способ состоит в том, чтобы заполнить эфир ложными радиосигналами.

Радиолокация — интереснейший раздел техники, находящий широкое применение для многих мирных целей и без которого сейчас невозможно мыслить средства обороны.

Соперником радиолокатора является лазер. Принципы локации объектов с помощью лазера не отличаются от описанных выше.

Радиолокационные принципы лежат в основе связи между космическими кораблями и Землей. Радиотелескопы расположены так, чтобы не терять корабль из вида. Их антенны имеют огромные размеры до сотен метров. Нужда в таких больших антеннах объясняется необходимостью послать очень сильный сигнал и принять слабый сигнал от радиопередатчика. Естественно, что очень важно иметь узкий радиолуч. Если антенна работает на частоте 2,2 миллиарда колебаний в секунду (длина волны около 1 см), то на расстоянии до Луны луч размывается всего лишь до диаметра в 1000 км. Правда, когда луч доберется до Марса (300 миллионов километров), то его диаметр уже будет равен 700 000 км.

ТЕЛЕВИДЕНИЕ

Поскольку 99 читателей из 100 ежедневно проводят час-другой около телевизора, было бы несправедливо не сказать несколько слов об этом великом изобретении. Сейчас речь пойдет лишь о принципах телевизионной передачи.

Идея передачи изображения на расстояние сводится к следующему. Передаваемое изображение разбивается на мелкие квадраты. Физиолог подскажет, каков должен быть размер квадрата, чтобы глаз перестал замечать изменения яркости внутри этого изображения. Световая энергия каждого участка изображения может быть при помощи фотоэлектрического эффекта преоб-

разована в электрический сигнал. Надо придумать способ, каким образом считывать эти сигналы. Конечно, это проводится в строго определенной последовательности, как при чтении книги. Эти электрические сигналы накладываются на несущую электромагнитную волну совершенно таким же способом, как это делается при радиопередаче. И далее события разыгрываются вполне тождественно радиосвязи. Модулированные колебания усиливаются и детектируются. Телевизор должен преобразовать электрические импульсы в видимое изображение.

Передающие телевизионные трубки носят название супериконоскопа, суперортикона и видекона. С помощью линзы изображение проектируется на фотокатод. Наиболее распространенными фотокатодами являются кислородно-цезиевый и сурьмяно-цезиевый. Фотокатод монтируется в вакуумном баллоне вместе с фотоанодом.

В принципе можно было бы передавать изображение, поочередно проектируя световой поток от каждого элемента изображения. В этом случае фототок должен протекать только в течение короткого времени, пока длится передача каждого элемента изображения. Однако такая работа была бы неудобна, и в передающей трубке используется не один фотоэлемент, а большое их количество, равное числу элементов, на которое разлагается передаваемое изображение. Эта приемная пластинка называется мишенью и выполняется в виде мозаики.

Мозаика — это тонкая пластинка слюды, с одной стороны которой нанесено большое количество изолированных крупинок серебра, покрытых окисью цезия. Каждое зернышко — фотоэлемент. С другой стороны слюдяной пластинки нанесена металлическая пленка. Между каждым зерном мозаики и металлом как бы образуется маленький конденсатор, который заряжается электронами, выбитыми из катода. Ясно, что заряд каждого конденсатора будет пропорционален яркости соответствующего места передаваемого изображения.

Таким образом, на металлической пластинке возникает как бы скрытое электрическое изображение предмета. Как же снять его с этой пластинки? С помощью электронного луча, который надо заставить

обегать пластинку так, как глаз скользит по строкам книги. Электронный луч играет роль ключа, замыкающего на мгновение электрическую цепь через микроконденсатор. Ток в этой мгновенно созданной цепи будет однозначно связан с яркостью изображения.

Каждый сигнал может и должен быть усилен во много раз обычными способами, применяемыми в радиотехнике. При передаче изображения глаз не должен замечать того, что электронный луч последовательно обегает разные точки светящегося экрана. Полное изображение, полученное на экране приемной трубки за один цикл движения электронного луча, называется кадром. Необходимо создать такую частоту смены кадров, чтобы за счет инерционности зрения не наблюдалось мелькание яркости.

Какую же надо взять частоту смены кадров? Выбрать надо число, связанное с частотой тока в сети. Дело в том, что пульсирующее напряжение, которое приложено к сетке электронно-лучевой трубки, создает на экране темные и светлые полосы. Если частота смены кадров будет равна или кратна частоте сети, то только в этом случае полосы будут неподвижны и незаметны. Слитность движения возникает при частоте смены кадров около 20 Гц, поэтому частота смены кадров в телевидении принята 25 Гц, но при этой частоте мелькание яркости еще заметно. Брать частоту кадров 50 Гц нежелательно, поэтому техники прибегли к следующему занятному приему: они воспользовались чересстрочной разверткой. Оставлена частота 25 Гц, но электронный луч прочерчивает сначала нечетные строки, а затем четные. Частота смены полукадров становится равной 50 Гц и мелькание яркости изображения становится незаметным.

Частоты кадровой и строчной разверток должны быть строго синхронизированы. Здесь нет места входить в технические детали, поэтому мы не станем объяснять, что эта синхронизация требует, чтобы число строк было нечетным и состояло из нескольких целых сомножителей. В нашей стране принято делить кадр на 625 строк, т. е. 5^4 ; поскольку в одну секунду сменяется 25 кадров, частота строк становится 15 625 Гц. Из этого условия вытекает ширина спектра частот телевизионного сигнала.

Низшая частота 50 Гц — частота полукадра. А высшая частота определяется временем для передачи одного элемента.

Довольно простой расчет, которого мы здесь не будем приводить, показывает, что высшую частоту приходится взять равной 6,5 МГц. Отсюда следует, что несущая частота передатчика не может быть меньше 40—50 МГц, поскольку частота несущей волны должна быть по крайней мере в 6—7 раз больше ширины полосы передаваемых частот. Теперь вам понятно, почему для телевизионных передач могут быть использованы только ультракороткие волны и почему, следовательно, дальность телепередачи ограничена прямой видимостью.

Но я оговорился — была ограничена. Революционным событием, позволяющим вести телепередачу на любые расстояния, является использование спутников связи.

Наша страна была первой, которая использовала спутники для этой цели. В настоящее время просторы нашей Родины охвачены связью, осуществляемой рядом спутников.

Не затрагивая вопроса об устройстве мощных телевизионных станций, приведем лишь интересные цифры, характеризующие огромные возможности современной радиотехники в усилении сигналов. Обычный видеосигнал имеет до усиления мощность до 10^{-8} Вт, усилитель мощности увеличивает его в миллион раз. Мощность в 10^3 Вт подается на параболическую антенну диаметром порядка 30 м. Эта антенна дает узко направленный луч, который будет отражен спутником. После того как электромагнитная волна пройдет примерно 35 000 км до спутника, ее мощность будет равна 10^{-11} Вт.

Усилитель, установленный на спутнике, увеличивает мощность этого исключительно слабого сигнала примерно до 10 Вт. Отраженный от спутника сигнал вернется на Землю с мощностью в 10^{-17} Вт. Усиление возвратит мощность видеосигнала к исходному значению 10^{-8} Вт.

Я думаю, что десять лет назад этим числам не поверил бы самый оптимистически настроенный инженер.

Невозможно закончить главу, посвященную радиотехнике, не сказав хотя бы несколько слов о новой революции, происходящей на наших глазах.

Речь идет о фантастической миниатюризации всех радиотехнических приборов, которая стала возможной благодаря переходу от приборов, составленных из отдельных элементов — сопротивлений, транзисторов и т. д., — соединенных между собой проволочками, к электрическим схемам, «нарисованным» при помощи специальной техники на кусочке кремния размером несколько миллиметров.

Новая технология (один из ее вариантов) состоит в том, чтобы, используя различного вида маски и серию химикатов, можно было бы вводить в нужные места кристалла кремния или германия *p*-примеси и *n*-примеси. Для этой цели применяют обработку ионными пучками.

Электрическая схема, состоящая из десятка тысяч элементов (1), размещается на площадке с линейными размерами около двух миллиметров. Когда мы сказали: «нарисовать» схему, у читателя могло создаться впечатление, что речь идет лишь об обработке поверхности кусочка полупроводника. Но это не так. Дело обстоит сложнее. Каждый радиотехнический элемент имеет трехмерную структуру. На крошечном участке кремния надо создать несколько слоев, содержащих разные количества примесей.

Что же нужно сделать для этой цели? Прежде всего на поверхности кремния создают слой окиси. На него накладывается светочувствительный материал. Получившийся бисквит освещается ультрафиолетовым светом через маску рассчитанной формы. После проявления на поверхности кремниевого кусочка образуются углубления лишь в тех местах, где свет прошел через маску.

Следующий этап состоит в обработке будущей радиосхемы с помощью плавиковой кислоты. Она удаляет окись кремния, но не действует ни на первичную поверхность (то есть кремний), ни на светочувствительный слой. Теперь последний шаг: действие другим растворителем, который удаляет светочувствительный слой.

В результате наш кусочек покрыт изолятором — окисью кремния — там, где этого требует расчет. Углубление нужной формы — обнажившийся кремний. Его-то и подвергают обработке ионным пучком для введения нужного количества примесей.

Создание микроэлектронных схем является в настоящее время одной из наиболее боевых отраслей техники.

Новые идеи и новые открытия в области физики полупроводников показывают, что достигнутые на сегодня фантастические результаты не являются предельными.

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ

Книга 3

ЭЛЕКТРОНЫ

М., 1979 г., 208 стр. 6 илл.

Редактор В. А. Григорова

Художники П. И. Чернуский,

Н. А. Калашникова

Художественный редактор Т. Н. Кольченко

Технический редактор В. Н. Кондакова

Корректор Т. С. Вайсберг

ИБ № 11160

**Сдано в набор 19.09.78. Подписано к печати 27.12.78. Т-23060. Бумага 84×108¹/₃₂. тип. № 3. Обыкновенная гарнитура. Высокая печать. Услови. печ. л. 10,92. Уч.-изд. л. 10,19. Тираж 400 000 экз. (1-й з-д 1—200 000)
Заказ № 3236. Цена книги 40 коп.**

Издательство «Наука»

Главная редакция

физико-математической литературы

117071, Москва, В-71, Ленинский проспект, 15

Ордена Октябрьской Революции

и ордена Трудового Красного Знамени

Первая Образцовая типография

имени А. А. Жданова Союзполиграфпрома

при Государственном комитете СССР

по делам издательства, полиграфии

и книжной торговли,

Москва, М-54, Валовая, 28

ФИЗИКА ДЛЯ ВСЕХ

Цена 40 коп.

